

Modernizace linky ZVN

Modernization of the EHV line

Bc. Jiří Nimrichter

Diplomová práce

Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec

Ostrava, 2021

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Doc. Dr. Ing. Zdeňku Medvecovi za odborné rady při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Josefu Veselému ze společnosti Čeps Invest a.s. za cenné rady při zpracování praktické části diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku modernizace přenosové soustavy ČR. Teoretická část popisuje základní elektrické parametry vedení vysokého napětí. Rozebrán je současný stav přenosové a distribuční soustavy. Následuje kapitola o konstrukci a použití stožárů pro vn, vvn a zvn. Důkladně jsou rozebrány atmosférické vlivy působící na venkovní vedení. V další kapitole vysvětlují základní principy mechaniky vedení, které jsou použity v praktické části diplomové práce, která je zaměřena na porovnání mechanických a elektrických parametrů stávajícího a modernizovaného vedení.

Klíčová slova

Elektrické parametry, zvláště vysoké napětí, přenosová soustava, mechanika vedení, modernizace.

Abstract

The diploma thesis is focused on the issue of modernization of the Czech transmission system. The theoretical part describes the basic electrical parameters of high voltage lines. The current state of the transmission and distribution system is analyzed. The following chapter on the construction and use of masts for HV, VHV and EHV. The atmospheric influences acting on the overhead lines are thoroughly analyzed. In the next chapter I explain the basic principles of line mechanics, which are used in the practical part of the thesis, which is focused on the comparison of mechanical and electrical parameters of existing and modernized lines.

Key words

Electrical parameters, especially high voltage, transmission system, line mechanics, modernization.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek.....	7
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	11
1. Základní elektrické parametry vedení.....	12
1.1 Činný Odpor.....	12
1.2 Indukčnost.....	12
1.3 Kapacita.....	15
1.4 Svod.....	16
2. Rozbor přenosové a distribuční soustavy ČR	18
2.1 Distribuční soustava	18
2.2 Přenosová soustava	19
2.3 Současný stav přenosové soustavy.....	20
3. Typy stožárů VVN a ZVN	21
3.1 Konstrukce stožárů	21
3.2 Rozdělení stožárů	21
4. Klimatické podmínky ovlivňující vlastnosti vodiče	24
4.1 Teplota.....	24
4.2 Námraza	24
4.2.1 Charakteristika zatížení vodiče námrazou.....	26
4.2.2 Ekvivalentní průřez vodiče s námrazou	27
4.2.3 Odstranění námrazy z vedení	28
4.3 Vítr	29
4.4 Současné působení klimatických vlivů na vodič.....	33
4.5 Vibrace a ochrana proti rozkmitání vodičů	34
5. Mechanika venkovního vedení.....	36
5.1 Odvození průhybové křivky	36
5.1.1 Nesouměrně zavěšený vodič	41
5.1.2 délka vodiče mezi závěsnými body.....	42

5.1.3 Namáhání vodiče a závěsů	43
5.2 Stavová rovnice vodiče	45
5.3 Kritické rozpětí a kritická teplota	46
6. Modernizace linky ZVN	48
6.1 Důvody modernizace	48
6.2 Modernizace vedení V402	48
6.3 Vodiče a stožáry	50
6.4 Vybrané kotevní úseky	50
6.5 Kotevní úsek A	50
6.6 Kotevní úsek B	51
6.7 Výpočet elektrických parametrů vedení	51
6.8 Ekonomické zhodnocení	54
7. Závěr	55
Literatura	56
Seznam příloh	57

Seznam použitých symbolů a značek

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
C	F	Kapacita
D	m	Průměr vodiče s námrazou
E	Pa	Modul pružnosti materiálu
F_H	N	Vodorovná složka síly ve vodiči
F_V	N	Vertikální složka síly
F_X	N	Síla ve směru osy x
F_y	N	Síla ve směru osy y
G	S/km	Svodová vodivost
K_h	-	Koeficient výšky pro zatížení námrazou
L	H	Indukčnost
M	H	Vzájemná indukčnost
R	Ω	Odpor
$\overline{S_p}$	VA	Přirozený výkon
U	V	Napětí
$\overline{Z_V}$	Ω	Vlnová impedance
a	m	Délka rozpětí
a_i	m	Ideální délka rozpětí
a_k	m	Kritické rozpětí
b	m	Šikmá vzdálenost
c	m	Parametr řetězovky
d	m	Průměr vodiče bez námrazy
dl	m	Element délky vodiče m
f_x	m	Charakteristický průhyb vodiče
f_m	m	Maximální průhyb vodiče
g	m/s ²	Tíhové zrychlení
$g1$	kg/m	Jmenovitá měrná hmotnost vodiče
h	m	Výška nad zemí resp. převýšení
h_I	m	Výškový rozdíl sousedních závěsů
k_T	-	Součinitel terénu
q_1	N/m	Zatížení vodiče bez námrazy

q_z	N/m	Zatížení vodiče s námrazou
q_{wc}	N/m	Jednotkové zatížení vodiče větrem
r	mm	Poloměr vodiče
r_e	mm	Ekvivalentní poloměr vodiče
$v_{b,0}$	m/s	Základní rychlost větru
v_h	m/s	Rychlost větru ve výšce h nad zemí
x_A, x_B	-	x-ová souřadnice závěsného bodu
y_A, y_B	-	y-ová souřadnice závěsného bodu
z	-	Přetížení vodiče
z_0	m	Třecí výška
α		Koeficient teplotní roztažnosti
γ	N/m ³	Měrná tíha vodiče
γ_G	-	Dílčí pravděpodobnostní koeficient zatížení tíhou
γ_I	-	Dílčí pravděpodobnostní koeficient zatížení námrazou
γ_W	-	Dílčí pravděpodobnostní koeficient zatížení větrem
Δl	m	Celková změna délky vodiče
Δl_ϑ	m	Prodloužení vodiče na základě teplotní roztažnosti
Δl_σ	m	Pružné zkrácení vodiče vlivem napětí
ϑ	°C	Teplota
ϑ_{krit}	°C	Kritická teplota
ρ	Kg/m ³	Hustota vzduchu
σ_H	Pa	Vodorovná složka namáhání ve vodiči
σ_k	Pa	Mechanické napětí pro kritickou teplotu
ψ_{wc}	-	Dílčí pravděpodobnostní koeficient kombinovaného zatížení námrazou a větrem

Seznamku obrázků

<i>Obr. 1.1 Záznam průběhu proudu v trojfázovém vedení</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1.2 Schéma transpozice</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 1.3 Kapacita trojfázového vedení s uvažováním vlivu země.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2.1 Distribuční oblasti ČR.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2.2 Druhy rozvodů.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2.3 Schéma přenosové soustavy</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3.1 Typy a tvary stožárů vedení 110 kV (220 kV)</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.2 Typy a tvary stožárů vedení 400 kV</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.1 Určení oteplovacích proudů v závislosti od teploty a rychlosti větru pro lana AlFe</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4.2 Přetížení vodiče větrem</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5.1 Element délky průhybové křivky.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.2 Souměrně zavěšený vodič.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5.3 Nesouměrně zavěšený vodič</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5.4 Nesouměrně zavěšený vodič – určení vertikálních sil.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 5.5 Utopený stožár</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 5.6 Závislost mechanického napětí od rozpětí, určení kritického rozpětí.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6.1 Schéma linky V402</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 6.2 Vedení V402</i>	<i>49</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1.1 Informativní hodnoty svodové vodivosti</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 2.1 Délka vedení podle úrovně napětí.....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2.2 Označení napěťových hladin</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 4.1 Referenční zatížení námrazou podle námrazových oblastí</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 4.2 Extrémní zatížení námrazou.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 4.3 Kategorie terénu.....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 4.4 Větrné oblasti</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4.5 Dynamický koeficient rozpětí.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4.6 Koeficienty aerodynamického odporu vodiče.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 5.1 Hodnoty parametru c</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6.1 Projekční tabulka kotevního úseku A</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6.2 Projekční tabulka kotevního úseku B</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6.3 Porovnání elektrických parametrů</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6.4 Ceny materiálů a montáží pro modernizovanou linku V402</i>	<i>54</i>

Úvod

Zvyšování životní úrovně vede ke zvyšování spotřeby elektrické energie, což klade velké požadavky na energetickou síť. Propojená evropská energetická soustava umožňuje přenášení výkonu napříč kontinentem, což vytváří tlak nejen na řízení elektrických soustav jednotlivých států, ale také na kvalitu přenosových linek. Modernizací elektrických vedení docílíme zvýšení spolehlivosti jednotlivých přenosových soustav.

V první části diplomové práce jsou rozebrány základní elektrické parametry vedení. Ty jsou důležité pro vyjádření přenosových schopností.

Druhá kapitola je zaměřena na rozbor přenosové a distribuční sítě v České republice. Zvláštní pozornost je kladena na současný stav energetické sítě. Je zde uveden vliv energetických společností provozující distribuční soustavu.

O stožárech a jejich použití se zmiňuje třetí kapitola, smyslem je poukázat na hlavní typy stožárů a jejich konstrukce.

Ve čtvrté kapitole jsou rozebrány atmosférické jevy a jejich vliv na mechaniku vodiče. Je zde vysvětlen vliv námrazy, větru a jejich vzájemné působení na vodič.

Pátá část je zaměřena na problematiku mechaniky vedení. Podrobně jsou uvedeny matematické úpravy. Pomocí těchto úprav je pak řešena praktická část diplomové práce.

Poslední šestá kapitola se týká modernizace linky zvláště vysokého napětí, je rozebrán význam vedení V402 propojující dva významné uzly pro Moravu. Dále jsou spočteny elektrické a mechanické parametry modernizovaného vedení.

1. Základní elektrické parametry vedení

1.1 Činný Odpor

Pro určení činného odporu je nutné respektovat řadu vlivů, jako je materiál vodiče, teplota, skinefekt (při střídavém proudu), prodloužení délky vodiče vlivem zkroucení dílčích vodičů u lan a prodloužení vlivem průhybu. Pro vyjádření odporu při průchodu stejnosměrným proudem používáme známý vztah: [1]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.1.1)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \quad (1.1.2)$$

Konstanta prostředí ρ , neboli měrný odpor, není závislý na směru proudu, což ovšem neplatí u krystalických látek, ale je takřka lineárně závislý na teplotě.

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \quad (1.1.3)$$

Dále pak tedy můžeme psát:

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \quad (1.1.4)$$

Jak už bylo zmíněno, při průchodu střídavého proudu odporem musíme počítat se skinefektem, který lze vysvětlit jako nerovnoměrné rozložení proudu v průřezu vodiče, nejvíce je závislý na frekvenci proudu, ale také na průřezu, měrném odporu a permeabilitě vodiče. Z důvodu nerovnoměrného rozložení proudu je odpor, kterým prochází střídavý proud, vyšší než v případě průchodu stejnosměrného proudu odporem. Pro vyjádření odporu zavádíme činitel k : [1]

$$R_{\text{stř}} = k \cdot R_{\text{ss}} \quad (1.1.5)$$

Skutečný činný odpor se zjišťuje pomocí měření, protože jako už bylo zmíněno, výsledný odpor je ovlivněn prodloužením délky vodiče vlivem zkroucení dílčích vodičů u lan a prodloužení vlivem průhybu.

1.2 Indukčnost

Při průchodu proudu vodičem se kolem něj vytváří elektromagnetické pole, které působí nejen na okolí, ale také na samotný vodič. Působení tohoto jevu nazýváme indukčnost, kterou dále dělíme na indukčnost vlastní a vzájemnou mezi jednotlivými vodiči. Indukčnost vedení je nejvíc závislá na vzdálenosti vodičů, ta je závislá na napěťové hladině a uspořádání vedení, tudíž je možné přibližně stanovit indukčnost vedení. Bereme-li v úvahu indukčnost vodiče na jednotku délky, můžeme vlastní indukčnost zapsat následujícím vztahem: [1]

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{2l}{r} - 0,15 \quad (1.2.1)$$

Kde r a l představují poloměr a délku vodiče, které se dosadí ve stejných jednotkách.

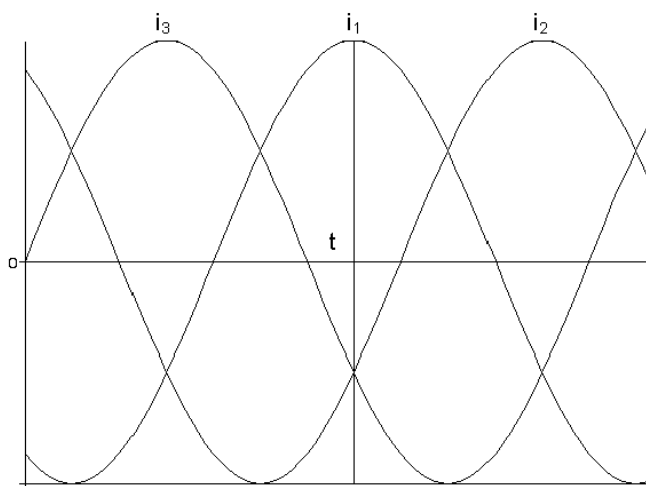
Vzájemnou indukčnost na kilometr platí vztah:

$$M = 0,46 \cdot \log \frac{2l}{a} - 0,2 \quad (1.2.2)$$

Kde a značí vzdálenost mezi vodiči

Jednoduché trojfázové nesymetrické vedení

U trojfázového vedení platí, že součet proudu v každém okamžiku se rovná nule. To ovšem ale neplatí pro vzájemné indukčnosti, které jsou mezi jednotlivými vodiči různé. Pro odvození proudových vztahů mezi těmito fázemi je zvolen čas t , kdy je jedna z fází v amplitudě.



Obr. 1.1 Znáznornění průběhu proudu v trojfázovém vedení [1]

Rovnice pro proudy v jednotlivých fázích:

$$-i_1 = i_2 + i_3, \quad i_2 = i_3 = -\frac{i_1}{2} \quad (1.2.3)$$

Dále pro elektromotorické napětí jednoho vodiče platí:

$$e = -L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{12} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{13} \frac{di_1}{dt} = -\left(L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13}\right) \frac{di_1}{dt} = -L_{C1} \frac{di_1}{dt} \quad (1.2.4)$$

A výslednou indukčnost jednoho vodiče:

$$L_{C1} = L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{13}}}{r} \quad (1.2.5)$$

Vzdálenost mezi příslušnými vodiči je zde značena jako a_{xy} .

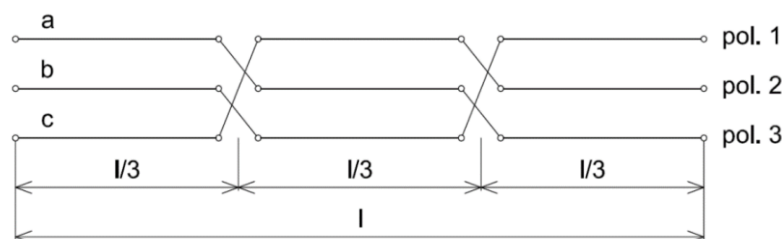
Stejným způsobem také lze odvodit rovnice pro zbylé dva vodiče a dále určit vztah pro střední indukčnost vedení, která je dán aritmetickým průměrem indukčnosti jednotlivých vodičů:

$$L_{Cstř} = \frac{1}{3} (L_{C1} + L_{C2} + L_{C3}) = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \quad (1.2.6)$$

Kde $L_{Cstř}$ indukčnost vedení na jeden kilometr [mH/km]
 a_{dy} střední vzdálenost mezi vodiči [m]
 r poloměr vodiče [m]

Transpozice vedení

Transpozice vedení neboli zákrut je uplatňován na vedeních VVN a ZVN, aby kvůli vlivu rozdílných indukčností nedocházelo k nesymetrii. Provádí se tím způsobem, že v hlavě stožáru jsou zaměněny pozice fázových vodičů. Celý cyklus je proveden tak, aby došlo k celkovému prostrídání všech fázových vodičů, čímž docílíme požadavku, mít přibližně stejnou indukčnost v každé fázi. Tím dojde tak k vyrovnaní rozdílu v podélných a příčných parametrech elektrického vedení. [2]



Obr. 1.2 Schéma transpozice [1]

Indukčnost svazkových vodičů

Pro vedení VVN a ZVN jsou používány vodiče ve svazcích, což znamená, že pro vedení elektrické energie v jedné fázi není využíván jen jeden vodič, ale celý svazek několika vodičů s určitou vzdáleností d . Počet svazkových vodičů může být různý, nejčastěji se ale používá trojsvazek, či čtyřsvazek. Jasnou výhodou použití svazkových vodičů je zlepšení mechanických vlastností vedení, v této části již zmíněná indukčnost, která je nižší, čímž je nižší i induktivní reaktance a dále jsou také sníženy ztráty koronou. [1]

Z hlediska elektromagnetického pole se svazkový vodič chová v podstatě jako kruhový vodič o tzv. ekvivalentním poloměru r_e . Pro který platí vztah:

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot d_{12} \cdot d_{13} \dots d_{1n}} \quad (1.2.6)$$

Tento vztah použijeme pro vyjádření výsledného vztahu pro střední indukčnost vedení se svazkovými vodiči:

$$L_{stř} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{\sqrt[n]{r \cdot d_{12} \cdot d_{13} \dots d_{1n}}} + \frac{0,05}{n} = 0,46 \cdot \log \frac{a_s}{r_2} + \frac{0,05}{n} \quad (1.2.7)$$

1.3 Kapacita

Elektrické pole vznikající kolem vodiče, působí jak na vodič, tak na své okolí. Z tohoto důvodu se na elektrickém vedení vytváří kapacita. Pro odvození kapacity vedení lze vycházet ze vztahu pro elektrický potenciál.

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{\rho} \quad (1.3.1)$$

$$Q = Q_1, \quad Q_2 = Q_3 = -\frac{Q}{2} \quad (1.3.2)$$

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{r} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{12}} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{13}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\sqrt{d_{12}d_{13}}}{r} \quad (1.3.3)$$

Kapacita jednoho vodiče:

$$C_1 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12}d_{13}}}{r}} \quad (1.3.4)$$

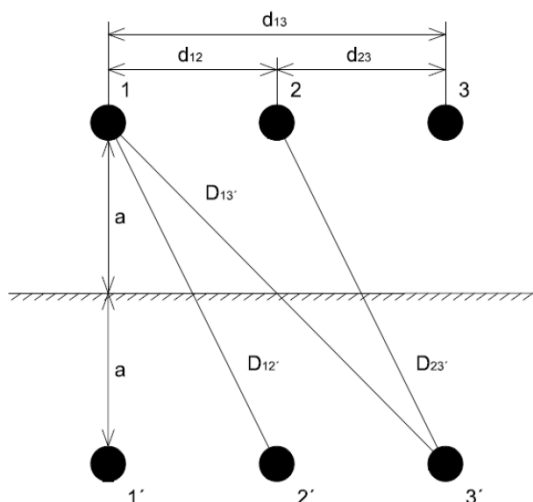
Analogicky lze psát i pro druhý a třetí vodič. Stejně jako u indukčnosti můžeme říct, že kapacita je v každém vodiči v určitý čas jiná. Dále se pak u vedení značí střední kapacita vedení, která je určena z aritmetického průměru kapacit fázových vodičů, kde jejich střední vzdálenost je značena jako d_S . [2]

$$C_{stř} = \frac{1}{3}(C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}}}{r}} = \frac{1}{18 \ln \frac{d_S}{r}} \quad (1.3.5)$$

$$d_S = \sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}} \quad (1.3.6)$$

Trojfázové vedení s uvažováním vlivu země

Pokud při výpočtech kapacity vedení uvažujeme i vliv země, je potřebné přidat vliv výšky vodičů nad zemí a také vzdálenosti vodičů zrcadlových obrazů. Tento krok je vysvětlen na následujícím obrázku a následně pak přidán v rovnici.



Obr. 1.3 Kapacita trojfázového vedení s uvažováním vlivu země [1]

Vzdálenost vodičů od země jsou stejné. Střední vzdálenost mezi vodiči a zemí tedy můžeme zapsat jako.

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad (1.3.7)$$

Dále výraz pro střední vzdálenost mezi vodiči a zrcadlicími vodiči.

$$D_S = \sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}} \quad (1.3.8)$$

A výsledná kapacita třífázového vedení, za předpokladu že jsou vodiče v jedné rovině, zapíšeme vztah

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{d_S}{r} \cdot \frac{2 \cdot m}{D_S}} \quad (1.3.9)$$

1.4 Svod

Prakticky neexistuje žádný dokonalý elektrický izolant. Za určitých podmínek jako je znečištění izolátorů, vlhko, déšť, prochází svodový proud z vodiče přes izolátory a stožáry do země. Tento proud je ve fázi s napětím vyvolávajícím, to znamená napětí mezi vodiči U_s a napětí proti zemi U_t s příslušným rozdílem potenciálů. Svodový proud koróny je rovněž ve fázi s napětím provozním. Měření těchto svodových proudů je velmi obtížné, protože svodová ztráta se objevuje se ztrátou dielektrickou pohromadě, takže ke svodovému proudu se přidává i kapacitní nabíjecí proud vedení s 90° fázovým posunem. [1]

Tab. 1.1 Informativní hodnoty svodové vodivosti [1]

U (kV)	G (S/km)
220	$(2,5 \div 3,6) \cdot 10^{-8}$
400	$(1,4 \div 2) \cdot 10^{-8}$

Svod se obvykle určuje výpočtem z naměřených nebo vypočtených trojfázových činných ztrát a korónou, dle vztahu (1.4.1).

$$G_1 = \frac{P_s}{U^2} \quad (1.4.1)$$

U venkovního vedení je svod způsoben hlavně povrchovým svodovým proudem, který je největší za deště nebo za vlhka, zvlášť je-li povrch izolátorů pokryt vodivou vrstvou nečistot např. uhelný prášek, chemické výpary. V takovém případě je třeba izolátory často kontrolovat a čistit. Ztráty svodem se vždy vyjadřují spolu se ztrátami korónou, protože oba druhy ztrát jsou funkcí napětí. [1]

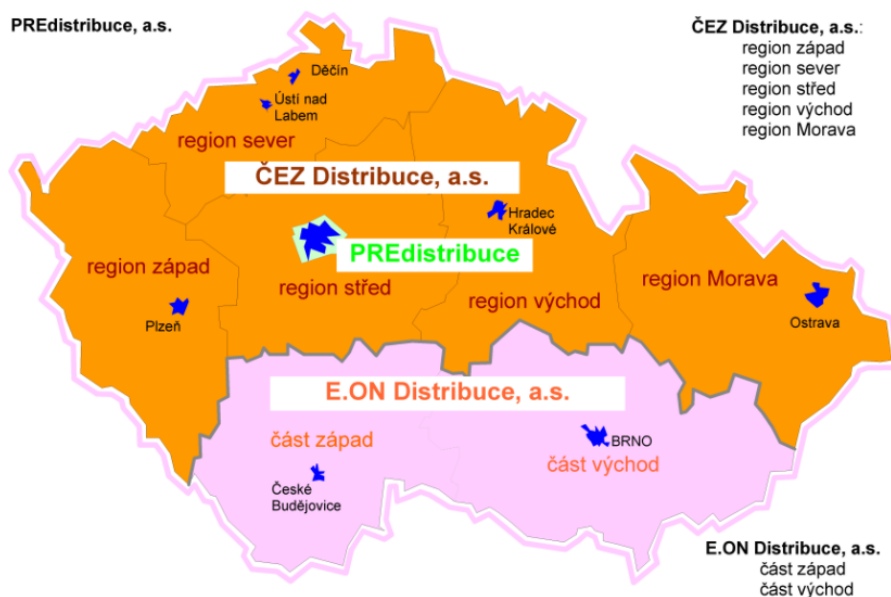
2. Rozbor přenosové a distribuční soustavy ČR

Roku 1878 byla elektrická energie poprvé průmyslově použita pro napájení obloukových lamp v Moravské Třebové, v prostorech tehdejší tkalcovny. Nebylo nutné se zabývat procesem přenosu, protože elektrická energie byla spotřebována v místě výroby. Vývoj vedl ke zřízení dalších elektráren, které byly vybudovány zejména ve větších městech, kde nejen že elektrinu vyráběly, ale také distribuovaly do okolních vesnic. Všechny dosavadní elektrárny pracovaly se stejnosměrným proudem, až roku 1900 byl spuštěn první třífázový generátor v Praze v Holešovicích. Výhody střídavého proudu byly nesporné, což vedlo k tomu, že v roce 1918 při vzniku Československa měla už přístup k elektrické energii třetina obyvatel. Další vývoj vedl ke vzniku elektrárenských společností, které zřizovaly dodávky energie k novým spotřebitelům. Napětí bylo zvoleno 3x380V/220V s frekvencí 50 Hz a napětí primárních distribučních sítí 22 kV a 100 kV. V poválečných letech až do 80. let vznikala postupným propojováním elektráren ucelená distribuční a přenosová soustava. [4]

2.1 Distribuční soustava

Distribuční soustava slouží k dodávce elektrické energie ke konečnému spotřebiteli. Do distribuční sítě je obvykle předána energie z přenosové soustavy, nebo může být připojena k menší výrobně elektrické energie. Typickým příkladem jsou větrné, nebo malé vodní elektrárny. V České republice je obvykle výkon distribuován na napěťových hladinách 110 kV a 22 kV pro města a vesnice, v průmyslu se ještě uplatňuje transformace na 10 a 6 kV. [3]

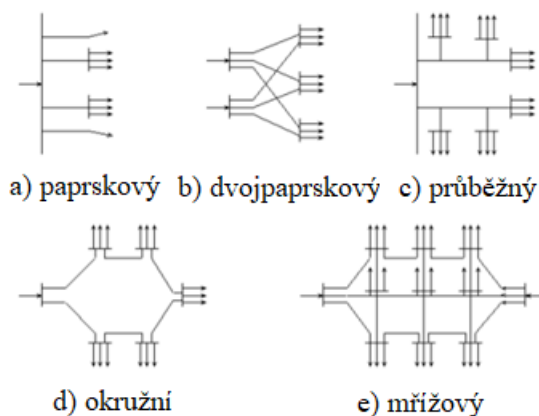
V současné době fungují v České republice tři distribuční společnosti. Pro sever Čech a Moravy to je společnost ČEZ Distribuce, a.s., na jihozápadě Čech a jihu Moravy firma E.ON Distribuce, a.s. Hlavní město Praha funguje se svojí vlastní distributorskou společností, která nese název PRE Distribuce, a.s. Vliv těchto společností je znázorněn na obrázku (2.1)



Obr. 2.1 Distribuční oblasti ČR [3]

Základní pilíř distribuční soustavy tvoří vedení 110kV, které distribuuje elektřinu z uzlových transformoven zvn/vvn a vvn/vvn do transformoven 110/vn kV. Do sítí 110 kV je vyveden výkon většiny malých elektráren s výkonem v řádech desítek MW. Jsou provozovány jako okružní se systémem distančních ochran. Nejčastěji jsou konstruována jako dvojité vedení, tedy dvě vedení na jednom stožáru.

Distribuční sítě vn jsou provozovány v kabelovém i venkovním vedení s napětím 35 a 22 kV. Napěťové hladiny 3, 6 a 10 kV jsou v současné době na ústupu a nahrazovány právě již zmíněný, napětím 22 a 35 kV. V sítích vn je nejrozšířenějším typem provozování paprsková síť, která je také většinou použita u distribučních sítí nízkého napětí, ovšem s výjimkou hustých městských sítí, které používají síť mřížovou. [3]



Obr.2.2 Druhy rozvodů [3]

2.2 Přenosová soustava

Přenosová soustava je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 400 kV a 220 kV, sloužící pro zajištění přenosu elektrické energie nejen po celém území ČR, ale také k propojení mezi soustavami sousedních států, včetně systému řídicí, ochranné, měřicí, zabezpečovací, telekomunikační a informační techniky. Je vlastněna a provozována společností ČEPS, a.s. a její dceřinou společností ČEPS Invest, a.s. [3]

Zvýšením napětí je docíleno menších ztrát při přenosu stejného výkonu, což je hlavně výhodou pro přenos na delší vzdálenosti. Nejenže přenosová soustava slouží k přenesení energie uvnitř ČR, ale také je využívána k přenášení výkonu mezi jednotlivými státy Evropské unie.

Do přenosové soustavy jsou také připojeny elektrárny velkých výkonů. Z generátoru elektrárny je výkon vyveden v napěťové hladině 6kV a 12 kV do blokových transformátorů, odkud je výkon dodáván do přenosové soustavy se jmenovitým napětím 400kV.

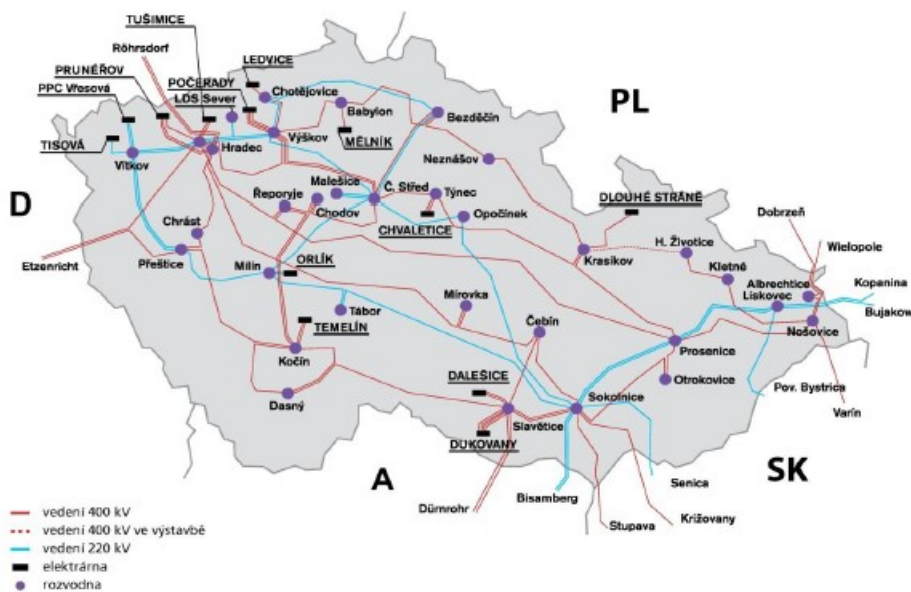
2.3 Současný stav přenosové soustavy

Společnost ČEPS v současné době provozuje 28 rozvodn na napětové hladině 400 kV a 12 rozvodn na hladině 220 kV, které jsou propojeny 75 linkami vedení 400 kV a 34 vedení s napětím 220 kV. Z toho je 11 linek 400kV a 6 linek 220kV propojených se sousedními státy. ČEPS ještě také provozuje 6 vedení 110 kV. Nejvyšší hustota vedení je v severních Čechách, kvůli velkému výskytu uhlí, které zpracovávají tepelné elektrárny např. Pruněrov, Tušimice, Počeradý. Také zde dochází k velkým přetokům z Německa. [4]

Společnost ČEPS má v plánu rozsáhlou modernizaci přenosové soustavy. Hlavním cílem je zvýšení přenosových schopností, zvyšování spolehlivosti a kvality elektrické energie.

Tab. 2.1 Délka vedení podle úrovně napětí [5]

Napětová úroveň (kV)	Celková délka (km)	Z toho dvojitě a vícenásobné vedení (km)
400	3 867	1 417
220	1 824	866
110	84	78



Obr. 2.3 Schéma přenosové soustavy [5]

Tab. 2.2 Označení napětových hladin

Napětová úroveň (kV)	Označení
400	zvň
220	vvň
110	vvň

3. Typy stožárů VVN a ZVN

Vzhledem k omezeným možnostem realizace přenosu kabelovým vedením, se pro přenos elektrické energie na dlouhou vzdálenost používá venkovní vedení, kde se pro mechanické upevnění vodičů používají podpěrné body, stožáry jako konstrukční části pro nesení vodičů pomocí izolátorových řetězců, jejichž další funkcí je oddělení částí s různým potenciálem.

3.1 Konstrukce stožárů

Rozměry konstrukce stožárů závisí na napěťové hladině, velikosti rozpětí, počtu vodičů a zemnicích lan, nosnosti půdy a terénu, použitého materiálu a funkci stožáru. Mezi součásti stožáru patří základ, dřík, hlava, most, konzoly.

Bavíme-li se o hloubce stožáru, je tím myšlena část stožárové konstrukce uložené v zemi. Výška stožáru je délka stožáru nad zemí, která závisí na uspořádání vodičů na hlavě stožáru, průhybu vodičů, délky izolátorových řetězců, vzdálenosti uzemňovacího lana od vodičů a požadované výšky spodního vodiče křížovaných objektů, nebo země. [6]

Na hlavách stožárů jsou vodiče uspořádané svisle, vodorovně, nebo kombinovaně podle potřeby. Je to vždy kompromis mezi volbou nižších stožárů se širším vyložením a nebo vyšších stožárů s užším vyložením. Je to tedy aspekt celkové výšky stožárů a šířky ochranného pásma. Kvůli velkému rozpětí, protože vodiče se při vyšvihnutí, způsobeným náhlým odpadnutím námrazy nedotknout, vedení je níž, a proto méně vystaveny bleskům, stožáry jsou nižší a vodiče na nich můžou mít větší vzdálenost mezi sebou i od konstrukce. [6]

Stožáry pro vvn a zvn jsou konstruovány z oceli. Nejpoužívanější typy ocelových stožárů jsou stožáry z profilové oceli, ocelových rour a pro nás nejdůležitější a nejvyužívanější typ příhradová konstrukce stožárů. Tento způsob je prováděn z ocelových profilů různých tvarů, tak aby vyhověl nejrozdílnějším technickým požadavkům. [7]

Pro vedení nn a vn jsou příhradové stožáry z válcového materiálu. Pro vedení vvn a zvn se v současnosti používají typizované stožárové řady. Pro jednoduché vedení 220 a 400 kV se nejčastěji používají stožáry typu portál, ten je také využit u linky V402, kde v posledních letech dochází u starších stávajících vedení, ke konstrukčnímu zesílení hlavy a mostu těchto typů stožárů. [7]

3.2 Rozdělení stožárů

Podle způsobu použití rozdělujeme stožáry na:

N – nosné, vybavené nosnými izolátorovými závěsy.

V – výstužné, kotevní podpěrný bod, na kterém je nebo není lomový bod tras vedení, sloužící navíc jako pevný bod ve vedení.

R – rohové, podpěrný bod vybavený kotevními izolátorovým závěsy.

RV – rohové výstužné, které se dimenzují jako rohové.

O – odbočný podpěrný bod, používaný v případě, kdy vedou jednotlivé vedení aspoň třemi různými směry, přičemž množství připojených systémů na podpěrný bod je vyšší než počet systémů připojených na sousedící podpěrné body, ovšem také v případě, že nejsou odbočné.

OV – odbočné výstužné, dimenzovány jako odbočné s uvažováním 2/3 tahu všech vodičů v poli průběžného a odbočujícího vedení.

Ko – koncové, jedná se o kotevní podpěrný bod, schopný zachytit celkový tah vodičů v jednom směru.

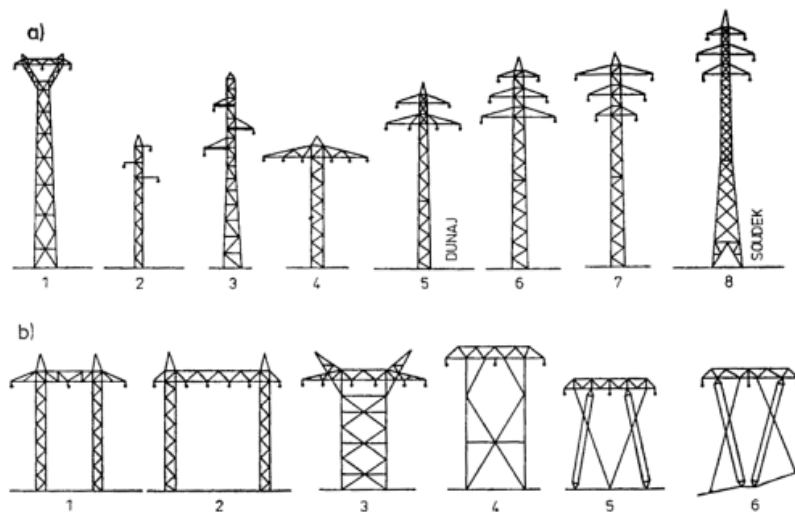
Dalšími typy stožárů jsou ještě křižovatkové stožáry nosné, výstužné a rohové výstužné. Platí pro zvýšené podmínky dimenzování. [6]

Podle počtu úrovní, v kterých jsou vodiče rozloženy, rozeznáváme:

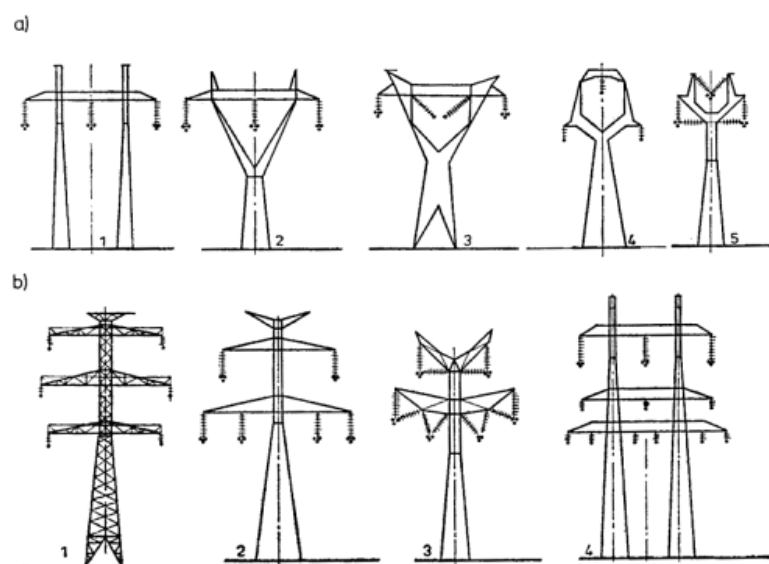
- rozložení v jedné úrovni, nejčastěji s jedním vedením, neboť dvojité vedení vyžaduje velké příčníky. Stožár je přitom jednodřívkový, častěji však dvojdrůvkový (portálový)
- rozložení ve dvou úrovních (např. dunajský typ); vodiče jsou uspořádány trojúhelníkovitě (výhodné z elektrotechnických důvodů)
- rozložení ve třech úrovních. Při dvojitém vedení je uspořádání symetrické, např. na způsob stromku, obráceného stromku nebo soudku. U jednoduchého vedení je uspořádání nesymetrické.

Souhrnným hlediskem třídění může být napětí elektrického vedení, podle kterého by se daly rozlišovat skupiny stožárů vvn:

- pro napětí 110 kV, relativně lehké konstrukce (obr. 3.2.1)
- pro napětí 220 kV, tvarově podobné stožárům pro 110 kV, jsou však vyšší a více namáhány
- pro napětí 400 kV (obr. 3.2.2), jsou už těžké konstrukce, z důvodu těžkých vodičů a velkých rozměrů



Obr. 3.2.1 Typy a tvary stožárů vedení 110 kV (220 kV) [6]



Obr. 3.2.1 Typy a tvary stožárů vedení 400 kV [6]

4. Klimatické podmínky ovlivňující vlastnosti vodiče

Přenosová soustava, a tudíž i vodiče musí odolávat přírodním vlivům jako jsou blesky, bouřky, námraza, vítr, změna teploty apod. Vliv těchto přírodních jevů se zkoumá pomocí dlouhodobých meteorologických pozorování a také pomocí provozních zkušeností z dosud postavených vedení. Jelikož jsou tyto jevy v každém podnebí rozdílné má proto i každý stát různou podobu předpisů pro řešení mechanického výpočtu vodičů. Pro Českou republiku máme normy, které dávají určitou míru bezpečnosti při projektování. [7]

Potřebné údaje pro návrh silových vedení jsou:

1. Maximální a minimální teplota
2. Vítr
3. Námraza
4. Současné působení jevů:
 - a) Teplota a vítr
 - b) Teplota a námraza
 - c) Teplota, vítr a námraza,
 - d) Teplota a bouřková činnost

4.1 Teplota

Jedním z nejdůležitějších parametrů pro řešení výpočtů a stavbu energetických sítí je teplota. Vliv teploty má za následek změnu namáhání ve vodiči, kde se současně mění průhyb. Pro návrh vedení je také důležité zjistit minimální a maximální hranici teploty, protože ve vyšších teplotách se snižuje pevnost materiálů. Na silový vodič má skrze teplotu vzduchu vliv intenzita slunečního záření, od úhlu dopadu slunečních paprsků, dále pak proudění vzduchu a samozřejmě proudové zatížení vodiče. V našich podmínkách je teplota uvažována od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. [7]

Maximální teplota vodiče je důležitá pro výpočet maximálního průhybu vedení a následného ověření bezpečné vzdálenosti od terénu. Naopak při nízkých teplotách se průhyb vedení zmenšuje, ale tato situace má zase jiná úskalí. Při zkrácení vodiče se výrazně zvětší síly, které působí na izolátory. Což může vést až k jejich poškození a ohrožení bezpečnosti okolí.

4.2 Námraza

Při řešení námrazy, vznikající na vedení vlivem nižších teplot, je jasné, že míra výskytu námrazy je dána zeměpisnou polohou. I když podmínky pro vznik námrazy trvají přibližně 2 měsíce v roce, je to důležitý faktor pro řešení spolehlivosti vedení, ale také to ovlivňuje samotný projekt vzdušného vedení, a to z pohledu řešení volby trasy a dimenzování stožárů, armatur a vodičů. [8]

Ze zkoumání poruch venkovního vedení vyplývá, že námraza má velký podíl (30-40%) na výskytu poruch, přičemž vliv těžké námrazy na poškození stožárů, trhání lan a izolátorů není tak velký, jako vliv výpadků vedení důsledkem mezifázových zkratů, které jsou zapříčiněny odpadáváním námrazy při současném působení větru. [7]

Podle české legislativy je námraza stanovena normou ČSN 50341-3, nebo také podnikovou normou energetiky pro rozvod elektrické energie PNE 33 3300. Zde je námraza definovaná ve formě jinovatky s měrnou hustotou $\rho_I = 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Dále je také určen postup pro výpočet vzniklé námrazy, kde se nejdříve určí referenční zatížení námrazou I_R . Jedná se o zatížení námrazou na jednotku délky vodiče v $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ve výšce $h = 10 \text{ m}$ nad zemí s navrhovanou životností vodiče $T = 50 \text{ let}$. To je doba, se kterou se počítá, že bude vedení v provozu. Skutečná doba provozu je někde mezi 30 až 80 lety. [7]

Následující tabulka určující referenční zatížení námrazou je zpracována z naměřených statistik hmotností námrazy, za předpokladu měření na tyči s průměrem 30 mm, s životností 20 let. Hmotnost námrazy na vodiči s průměrem 30 mm, v příslušné námrazové oblasti je definována číslem za písmenem I. To znamená, že do 1 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ v oblasti I-1, pro I-2 to jsou 2 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ atd. Výjimečné jsou jen námrazové oblasti I0, kde je námraza uvažována pouze do 0,5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ a Ik s odpovídající hmotností do 18 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$. [7]

Tab. 4.1 Referenční zatížení námrazou podle námrazových oblastí [7]

Námrazová oblast	Hmotnost námrazy na tyči o průměru 30 mm mr (kg/m)	Referenční zatížení námrazou IR (N/m) na jednotku délky vodiče o průměru d (mm)	
		d ≤ 30 mm	d > 30 mm
I-0	0,5	1,064 + 0,1280 d	3,963 + 0,0314 d
I-1	1	3,175 + 0,2212 d	8,515 + 0,0432
I-2	2	8,661+0,3653 d	17,53 + 0,07 d
I-3	3	15 + 0,481 d	25,46 + 0,132 d
I-5	5	29 + 0,668 d	43,84 + 0,174 d
I-8	8	51,7 + 0,893 d	73,89 + 0,153 d
I-12	12	83,66 + 1,135 d	107,8 +0,33 d
I-18	18	133,53 +1,435 d	176,58
I-k	>18	Stanoví se individuálně dle případu	
Pozn.: V námrazové oblasti I-0 se pro účely návrhu uvažuje zatížení námrazou jako v námrazové oblasti I-1			

Jednotlivé námrazové oblasti jsou dle normy označovány velkým tiskacím písmenem I a čísly (např. I-2).

Z praxe vyplývá, že náklady na stavbu delšího vedení nepřevyšují náklady spojené se zabezpečením vedení před vlivem námrazy. Proto je při projektování vhodnější vybírat místa s menším výskytem námrazy.

4.2.1 Charakteristika zatíženého vodiče námrazou

Chceme-li určit charakteristické zatížení vodiče námrazou, nestačí uvažovat jen s námrazovou oblastí, ale je nutné zvážit i výšku vodiče nad zemí. Vztažnou hodnotou pro výšku je 10 m. Nejdříve určíme vztah pro výpočet charakteristického zatížení námrazou na jednotku délky vodiče.[7]

$$I_K = K_h \cdot I_R \quad (4.2.1)$$

kde I_R je referenční zatížení námrazou
 K_h je koeficient výšky pro zatížení námrazou.

Koeficient výšky pro námrazové oblasti N0 až N3, uvažujeme-li výšku nejnižšího vodiče s průhybem při teplotě -5°C, bez námrazy.

$$K_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,13} \quad (4.2.2)$$

Pro námrazové oblasti I-5 až I-8 určíme koeficient výšky ze vztahu

$$K_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,25} \quad (4.2.3)$$

Po stanovení charakteristického zatížení námrazou, následuje určení návrhového zatížení námrazou na jednotku délky vodiče, také s uvažováním ve výšce h nad zemí, ovšem se zahrnutím tzv. dílčího pravděpodobnostního koeficientu zatížením námrazou.

$$I_d = \gamma_I \cdot I_K \quad (4.2.4)$$

V následující kapitole o mechanice vedení bude výsledné navrhované zatížení námrazou I_d označené jako q_2 , což je zatížení, které je definováno jako tíha námrazy na jednotku délky vodiče, v dané výšce bez uvažování síly větru.

Určení dílčích koeficientů zatížení při mezních stavech únosnosti

Mezním stavem únosnosti je myšlen stav, kdy může dojít ke konstrukčním poruchám, kterou mohou ohrozit bezpečnost. V tomto případě jde o tah vodiče v kterémkoliv místě rozpětí při navrhovaném zatížení, které nesmí přesáhnout 55% matematické pevnosti vodiče. Jeli to nutné, může být při projektování určena i nižší hodnota. Dílčími koeficienty jsou pak zatížení námrazou γ_I , zatížení větrem, koeficient při současném působení větrů a námrazy Ψ_{wc} a redukční koeficient α na zatížení námrazou, které slouží k posouzení v mezních stavech únosnosti pro navrhovanou životnost 50 let a uvažovanou úroveň spolehlivosti, která určuje důležitost daného vedení a značí míru, jak moc je vzniklou poruchou ohrožena bezpečnost uživatelů. [7]

Pro γ_w venkovní vedení se předpokládají tři úrovně spolehlivosti uvedené v tabulce.

Tab.4.2 Extrémní zatížení námrazou [7]

Zatěžovací stav	Tíha	Úroveň spolehlivosti					
		1		2		3	
	γ_G	γ_w	γ_i	γ_w	γ_i	γ_w	γ_i
Extrémní vítr (-5°C)	1	1		1,2		1,4	
Minimální teplota	1,2	-30 °C		-30 °C		-40	
Rovnoměrné zatížení námrazou (-5°C)	1		1		1,25		1,5
Kombinované zatížení větrem a námrazou (-5°C)	1	1		1		1	
		$\Psi_{wc} = 0,25$		$\Psi_{wc} = 0,25$		$\Psi_{wc} = 0,25$	

4.2.2 Ekvivalentní průřez vodiče s námrazou

Průměr vodiče s námrazou stanovíme dle vzorce

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{4 \cdot I_d}{g \cdot \pi \cdot \rho_1}}, \quad (4.2.5)$$

kde D je průměr vodiče s námrazou (m)
 d je průměr vodiče bez námrazy (m)
 I_d je návrhové zatížení vodiče námrazou (N/m), nebo také q_2 zatížení námrazou
 g je tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 ρ_1 je hustota námrazy $\rho_l = 500 \text{ kg/m}^3$.

Chceme-li určit mechaniku daného vodiče, tak je potřeba zavést místo tíhy jednoho metru vodiče, takzvané přetížení vodiče z , které je definováno jako poměr tíhy přetíženého vodiče k váze vodiče bez námrazy: [8]

$$z = \frac{q_1 + q_2}{q_1}, \quad (4.2.6)$$

kde q_1 je zatížení vodiče bez námrazy (N/m)
 q_2 je zatížení vodiče námrazou (identické jako char. zatížení námrazou I_d) (N/m).

Zatížení vodiče bez námrazy:

$$q_1 = g_1 \cdot g, \quad (4.2.7)$$

kde g_1 je jmenovitá měrná hmotnost vodiče (tabulková hodnota) (kg/m)
 g je tíhové zrychlení ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

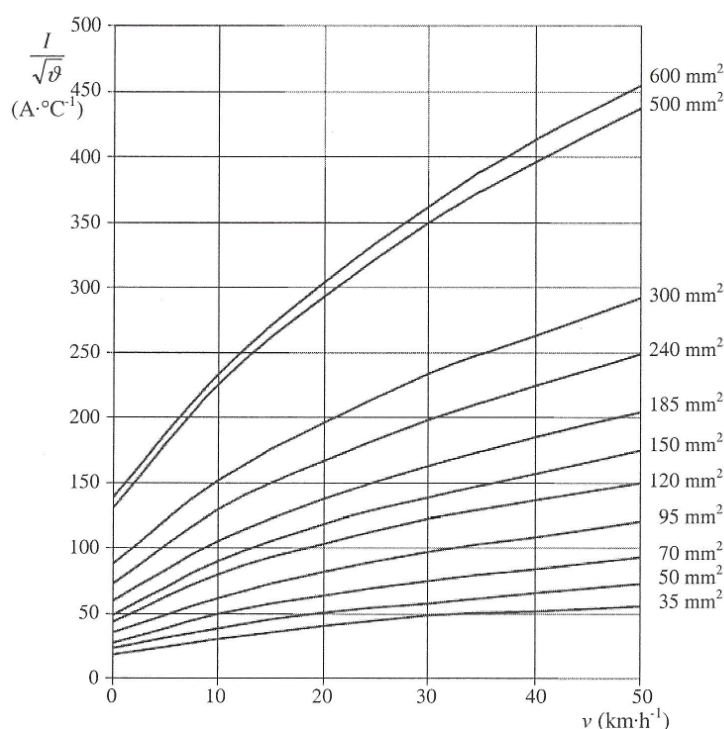
4.2.3 Odstranění námrazy z vedení

Odstranit námrazu z elektrického vedení je možné mechanickým způsobem například oklepávání vodičů, nebo stírání námrazy. Tyto postupy ale nejsou dostatečně účinné, jednak pro svoji technickou, tak i časovou náročnost, vezmeme-li v úvahu rozsah instalovaných elektrických sítí. Také je nutné dodat, že při mechanickém odstraňování námrazy dochází k poškození vedení a tím i k zastavení dodávky elektrické energie. Z těchto důvodů je proto mnohem technicky vhodnějším způsobem odstranění námrazy z elektrického vedení pomocí vyhřívání elektrickým proudem. [7]

Vodiče lze vyhřívat při přerušené dodávce anebo při nepřerušené dodávce elektrické energie. Při přerušené dodávce je zkratované vedení napájené jednosměrným, nebo střídavým proudem ze samostatného zdroje. K odstranění námrazy při nepřerušené dodávce slouží provozní proud, při kterém vznikne takové zatížení, aby došlo k odtavení námrazy od vodiče. K tomu, aby došlo ke skutečnému odpadnutí námrazy, je nutné vodič zahřát alespoň o 40 °C vyšší teplotu, než je teplota okolí. Mezní teplota, při které ještě nedochází k poškození vodičů, případně jejich spojů je 130 °C. [7]

Preventivně lze zamezit namrzání vodiče při vyhřívání vodiče na teplotu +9°C. Aby se tato teplota ve vodičích udržela, je potřebné opakovat vyhřívání po každých 6 hodinách. Pro zjištění preventivních ohřívacích proudů jsou určeny hodnoty, které jsou vyneseny v diagramu.

Potřebný oteplovací proud I je určen z hodnoty $I/\sqrt{\vartheta}$, kde ϑ je teplota ve stupních pod nulou.



Obr. 4.1 Určení oteplovacích proudů v závislosti od teploty a rychlosti větru pro lana AlFe [7]

4.3 Vítr

Vítr vzniká vlivem rozdílného tlaku a teploty v různých vrstvách atmosféry. Pohybuje se směrem do oblasti s nižším tlakem a větší teplotou. Větší rozdíly atmosférického tlaku způsobují vyšší rychlost větru. Dále je pohyb vzduchu ovlivněn podmínkami, jimiž jsou: [8]

- Meteorologická situace, která je charakterizována tlakovými nížemi a výšemi nad celým zemským povrchem.
- Sluneční záření, které prohřívá zemský povrch. Je-li povrch s porostem, nebo bez porostu, je pokrytý lesem, případě velkými vodními plochami, má za důsledek značné pohyby vzduchu ve vertikálním směru.
- Výskyt překážek, ovlivňující obtékání vzduchu, čímž dochází ke stlačení vzduchové vrstvy a v některých místech k vytváření vzdušných vírů, dále dojde ke změnám rychlosti větru, což je vnímáno jako náraz větru.

Kategorie terénu

Elektrické vedení se může vyskytovat v různých typech terénu, které jsou podle normy ENV 1991-2-4 rozděleny do pěti kategorií, pro které je určen pomocný koeficient terénu k_T a koeficient třecí výšky z_0 . [7]

Tab. 4.3 Kategorie terénu [7]

Kategorie terénu	Charakteristika terénu	k_T	z_0
I	Bouřlivé otevřené moře, jezera do vzdálenosti nejméně 5 km proti směru větru a rovná plocha krajina bez překážek	0,17	0,01
II	Zemědělská půda s hraničními živými ploty, rozptýlené malé zemědělské usedlosti, domy a stromy	0,19	0,05
III	Předměstské nebo průmyslové oblasti a trvale zalesněná území	0,22	0,3
IV	Městské oblasti, ve kterých je alespoň 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami s průměrnou výškou nad 15 m	0,24	1
V	Hornatý a více členitý terén, kde se vítr může místně zesilovat nebo zeslabovat	Hodnotí se individuálně	

Rychlost větru

Stejně jako u námrazy a terénu, tak i vítr je rozdělen do pěti oblastí, přičemž je každá větrná oblast charakterizována referenční hodnotou rychlosti větru.

Tab. 4.4 Větrné oblasti [7]

Větrná oblast	I	II	III	IV	V
Základní rychlost větru $v_{b,0}$ (m/s)	22,5	25	27,5	30	36

Rychlost větru v libovolné výšce

Určuje se pro venkovního vedení, jsou-li jeho výš než 10 metrů nad zemí. Pro výpočet nárůst rychlosti větru se používá logaritmická závislost, tedy:

$$v_h = k_T \cdot \ln \frac{h}{z_0} \cdot v_{b,0} \quad (4.3.1)$$

Dále lze stanovit dynamický tlak větru na libovolný prvek vedení, bez uvažování námrazy:

$$q_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_h^2 \quad (4.3.2)$$

kde ρ je hustota vzduchu, uvažována $1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ nezávisle na teplotě a nadmořské výšce

V případě, že vítr fouká na vedení v různých směrech, znamená to, že v každém místě vedení bude rychlost větru a tím i síla na něj působící, rozdílná. Proto je vyjádření síly větru Q_{WX} v kolmém směru, na libovolný prvek vedení X, dán vztahem:

$$Q_{WX} = q_h \cdot G_q \cdot G_{DX} \cdot C_X \cdot A \quad , \quad (4.3.3)$$

kde q_h je dynamický tlak větru (N/m^2)

G_q je nárazový koeficient větru (-)

G_{DX} je dynamický koeficient daného konstrukčního prvku (-)

C_X je aerodynamický součinitel, závisející na tvaru konstrukčního prvku (-)

A je průmět plochy daného prvku do roviny kolmé na směr působení větru (m^2).

Zatížení vodiče větrem

Důležitým faktorem při určování mechaniky zavěšeného vodiče je síla větru, která působí na vodič v příčném směru a zároveň tak zvyšuje tah ve vodiči. Síla větru q_{WC} , působící na jeden metr vodiče v daném rozpětí je dána vztahem.

$$q_{WC} = q_h \cdot G_q \cdot G_{DC} \cdot C_C \cdot d \cdot \cos^2 \phi \quad , \quad (4.3.4)$$

kde d je průměr vodiče (m)

ϕ je úhel náběhu rozhodujícího směru větru.

Dynamický koeficient rozpětí vodiče G_{DC} , který zohledňuje fakt, že tlak větru na vodič nedosahuje svého maxima v celé délce rozpětí. Lze vypočíst pomocí vztahů v tab. (4.5), kde a je rozpětí v metrech.

Tab. 4.5 Dynamický koeficient rozpětí [7]

Kategorie terénu	Vzorec	Větrné rozpětí (m)					
		100	200	300	400	600	800
I	$1,3 - 0,073 \cdot \ln(a)$	0,96	0,91	0,88	0,86	0,83	0,81
II	$1,3 - 0,082 \cdot \ln(a)$	0,92	0,87	0,83	0,81	0,78	0,75
III	$1,3 - 0,098 \cdot \ln(a)$	0,85	0,78	0,74	0,71	0,67	0,65
IV	$1,3 - 0,11 \cdot \ln(a)$	0,79	0,72	0,67	0,64	0,6	0,57

Při výpočtu síly větru na vodič se v závislosti od průměru d používají hodnoty koeficientu aerodynamického odporu vodiče C_c uvedené v tabulce.

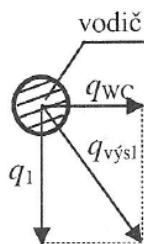
Tab. 4.6 Koeficienty aerodynamického odporu vodiče [8]

Koeficient aerodynamického odporu vodičů C_c (-)	Průměr vodiče d (mm)
1	$d > 16$ mm
1,1	$12,5 \leq d < 16$ mm
1,2	$d < 12,5$ mm

Celková síla větru ovlivňující svazek fázových vodičů se vyjádří jako součet sil působící na každý vodič svazku. Působení větru na vodič se určí ze vztahu.

$$z = \frac{q_{výsl}}{q_1} = \frac{\sqrt{q_1^2 + q_{wc}^2}}{q_1} \quad (4.3.5)$$

kde q_1 je vlastní tíha vodiče (N/m)



Obr. 4.2 Přetížení vodiče větrem [7]

Síla větru na podpěrný bod v přímé trase

Tato síla působí ve vodorovném a kolmém směru na rozpětí. Síla větru pochází od každého vodiče ze sousedních rozpětí. Počítá se s hodnotami dynamického tlaku a nárazového koeficientu větru. Určí se pro vodič v rozsahu polovin sousedních rozpětí podle vztahu. [7]

$$Q_{WC} = q_h \cdot G_q \cdot G_{DC} \cdot C_c \cdot d \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} \cdot \cos^2 \phi, (4.3.6)$$

kde a_1 a a_2 jsou délky dvou sousedních rozpětí k podpěrnému bodu (m).

Síla větru na izolátorové závěsy

Izolátor se může vlivem větru vychýlit, proto je nutné pro splnění bezpečnostních požadavků určit vychýlení, které je dáno jak silou větru působící na vodič, tak i silou větru působící na izolátorové závěsy. Samotná síla větru, která působí přímo na izolátorový závěs, je dána vztahem: [7]

$$Q_{Wins} = q_h \cdot G_q \cdot G_{Dins} \cdot C_{ins} \cdot A_{ins}, (4.3.7)$$

kde G_{Dinst} je dynamický koef. rezonance pro izolátorové závěsy (v rozmezí 1,05-1,15) (-)
 C_{ins} je koeficient aerodynamického odporu pro izolátorové závěsy je roven 1,2 (-)
 A_{ins} je plocha izolátorového závěsu na kterou vítr působí (m²).

Síla větru na příhradové stožáry

Pro velkou výšku stožáru je výpočet pro vyjádření síly prováděn po částech. Pro příhradové stožáry s pravoúhlým příčným řezem by se výška jedné části neboli panelu měla rovnat půlce obvodu jednoho stožáru. Síla větru působící v těžišku jednoho panelu je:

$$Q_{Wt} = q_h \cdot G_q \cdot G_{Dt} \cdot [1 + 0,2 \sin^2(2\phi)] \cdot (C_{t1} \cdot A_{t1} \cdot \cos^2 \phi + C_{t2} \cdot A_{t2} \cdot \sin^2 \phi), (4.3.8)$$

kde G_{Dt} je dynamický koeficient stožáru (-)
 C_{t1} je koef. aerodynamického odporu čelní stěny 1. panelu kolmé na směr větru (-)
 C_{t2} je koef. aerodynamického odporu čelní stěny 2. panelu kolmé na směr větru (-)
 A_{t1} je účinná plocha prvků čelní stěny 1. panelu (m²)
 A_{t2} je účinná plocha prvků čelní stěny 2. panelu (m²)

ϕ je úhel směrem větru a podélnou osou příhradové konzoly ($^{\circ}$).

Síla větru na příhradové konzoly

Je možné přibližně určit ze vztahu:

$$Q_{Wtc} = q_h \cdot G_q \cdot G_{Dt} \cdot C_{tc} \cdot A_{tc} \cdot (\sin\phi + \cos\phi) \quad , \quad (4.3.9)$$

kde C_{tc} je koeficient aerodynamického odporu příhradové konzoly (-)
 A_{tc} je účinná plocha prvků čelní stěny příhradové konzoly (m^2).

4.4 Současné působení klimatických vlivů na vodič

Řešíme-li současném působení klimatických vlivů na vodič, pak vycházíme z faktorů, jako je rychlost větru, kdy se na vodiči vyskytuje námraza, hmotností námrazové vrstvy na vodiči a tvarem námrazy, tedy průměrem a příslušným součinitelem aerodynamického odporu. Při zjišťování vlivu kombinovaného zatížení větrem a námrazou na ostatní prvky vedení, stačí pouze upravit aerodynamický součinitel pro stožárové konstrukce, nebo namrzlé izolátory. [7]

Abychom zjistili kombinované zatížení vodiče větrem a námrazou, stanovíme nejdříve mírnou rychlost větru, která je dána jako 50% extrémní rychlosti větru v dané oblasti. Dále se pak uvažuje s hustotou námrazy a součinitelem aerodynamického odporu. Nakonec se podle tabulky (4.5) určí součinitel pro kombinované zatížení vodičů větrem a námrazou.

Dynamický tlak větru namrzlého vodiče je pak dán vztahem:

$$q_{hcl} = q_h \cdot \psi_{wc} \quad , \quad (4.4.1)$$

kde q_h je dynamický tlak větru (N/m^2)
 ψ_{wc} je součinitel kombinovaného zatížení větrem a námrazou (-).

Pro jednotkové zatížení omrzlého vodiče větrem je vztah:

$$q_{wc} = q_{hcl} \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_{cl} \cdot D \cdot \cos^2\phi \quad , \quad (4.4.2)$$

kde q_{hcl} je dynamický tlak větru na omrzlý vodič (N/m^2)
 G_q je nárazový koeficient větru (-)
 G_c je dynamický koeficient daného konstrukčního prvku (-)
 C_{cl} je aerodynamický součinitel omrzlého vodiče (-) $C_{cl} = 1,1$
 D je průměr vodiče s námrazou (m)
 ϕ je úhel náběhu mezi uvažovaným směrem větru a směrem rozpětí ($^{\circ}$).

Výsledné přetížení větrem a námrazou je pak dáno vztahem (4.4.3), který udává poměr mezi novou hodnotou přetížení k tíze vodiče bez působení větru a námrazy.

$$z = \frac{\sqrt{(q_1 + I_d)^2 + (q_{wc})^2}}{q_1} , \quad (4.4.3)$$

kde q_1 je zatížení vodiče bez námrazy (N/m)
 I_d je návrhové zatížení námrazou na jednotku délky vodiče (N/m)
 q_{wc} je jednotkové zatížení omrzlého vodiče větrem (N/m).

4.5 Vibrace a ochrana proti rozkmitání vodičů

Zatížení, které způsobí námraza vede k prodloužení vodiče, čímž také dojde ke zvýšení namáhání daného vodiče a jeho vychýlení do vodorovné polohy. Rovnoměrná rychlost větru, se spodní hranicí 0,2 až 1,2 m/s a horní hranicí 4-11 m/s, může způsobit kmitání vodičů ve svislé rovině, kterému se také říká tančení vodičů. Je-li rychlost větru vyšší, tak už ke kmitání nedochází, protože proudění větru není rovnoměrné. Pravděpodobněji vznikne kmitání na rovném terénu, protože výše položená oblast bývá členitější, čímž je rovnoměrnost proudění narušena. Z praktických měření také vyplývá, že do délky rozpětí 100 metrů k vibracím takřka nedochází. [8]

Podmínkou pro vznik kmitání je rovnost mezi vlastní frekvencí vodiče f_v a vynucenou frekvencí větrem f_{vn} , kterou lze přibližně stanovit

$$f_{vn} = 200 \cdot \frac{v}{d} , \quad (4.5.1)$$

kde v je rychlost větru (m/s)
 d je průměr vodiče (mm).

Vlastní frekvence vodiče, uvažovaný jako hmotné vlákno, pak

$$f_v = \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{F}{g_1}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} , \quad (4.5.2)$$

kde λ je délka vlny (m)
 F je tah ve vodiči (N)
 g_1 je hmotnost jednoho metru vodiče (kg/m)
 σ je namáhání vodiče (MPa)
 γ je měrná hmotnost vodiče (kg/m³).

Z rovnosti frekvencí lze určit délku vlny (m):

$$\lambda = \frac{d}{200 \cdot v} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} \quad (4.5.3)$$

Frekvence kmitání se pohybuje mezi 10 až 15 Hz, délka stojaté vlny na vodiči 1 až 20 metrů a amplituda několik cm. Dlouhodobým vlivem kmitání vzniká dodatečné dynamické namáhání vodiče, čímž může dojít k narušení pevnosti vodiče a následně k jeho přetržení.

Ochrana proti kmitání může být:

Pasivní, použití výkyvných lehkých svorek, zesílení vodičů u výstupu ze svorek ovinutím páskou nebo obalem z pružných drátů

Aktivní, která spočívá v posunu vlastní frekvence vodiče mimo oblast frekvencí vynucených větrem. Lze provést antivibračními lany nebo tlumiči kmitání, které se montují do místa kmitny vodiče. Obvykle se montují z obou stran upevňovací svorky.

5. Mechanika venkovního vedení

Řešíme-li mechaniku zavěšeného vodiče, zabýváme se jeho průhybem a mechanickým napětím ve vodiči. Tyto mechanické vlastnosti jsou důležité při projektování venkovních silových vedení, a to hlavně z důvodů: [7]

- a) Provozních – vedení musí být dostatečně odolné při provozních stavech, tak aby nebyl ohrožen přenos elektrické energie i při náročnějších klimatických podmínkách, které známe z předchozí kapitoly, jako je vítr, či námraza.
- b) Bezpečnostních – zde je důležité zohlednit předpisy a normy pro stanovení nejmenších vzdáleností vodiče od dalších objektů, jiných vedení, pozemní komunikace atd. Pro výběr vhodného řešení se počítá s různými atmosférickými podmínkami.
- c) Ekonomické – zvolíme-li vhodné mechanické napětí ve vodičích a tím i průhyb, pak můžeme počítat i s menší hmotností a následně i cenou stožárové a základové konstrukce.

Připojením vodiče mezi dva závěsné body, se z vodiče nevytvoří přímka, ale vlivem hmotnosti se prohne a vznikne tzv. průhybová křivka. Vyjádření polohy vodiče vychází z předpokladů:

- hmotnost elementu vodiče závisí na položení vodiče v daném bodě a vodič vytvoří tzv. pružnou řetězovku.
- hmotnost je rovnoměrně rozdělena podél vodiče, průhybová křivka je tvořena řetězovkou.
- hmotnost vodiče je rovnoměrně rozdělena podél spojnice závěsných bodů, průhybová křivka je tvořena parabolou.

5.1 Odvození průhybové křivky

Pro odvození průhybové křivky je nutné určit zavěšení vodiče, tedy jde-li o zavěšení souměrné, kdy jsou závěsné body ve stejné nadmořské výšce, nebo nesouměrné, kdy závěsné body ve stejné nadmořské výšce nejsou. Pro lehčí znázornění je lepší odvozovat zavěšení souměrné. Důležitým aspektem při odvozování zavěšení, je vycházet z mechanických podmínek rovnováhy, tedy že vodič se nachází v klidu. Pak musí být vektorový součet všech sil, které na něj působí nulový a dále musí být součet momentů sil v libovolném bodu vodiče také nulový. [7]

Pro ověření podmínek rovnováhy se zvolí libovolný element vodiče v bodě (x,y) o délce dl (m).

Ve směru osy x se součet působících sil rovná 0:

$$\sum F_X = 0, \quad F_{H1} - F_{H2} = 0 \Rightarrow F_{H1} = F_{H2}, \quad (5.1.1)$$

kde F_H jsou horizontální síly v bodech 1 a 2 sledované křivky (I).

Ve směru osy y se součet působících sil rovná 0:

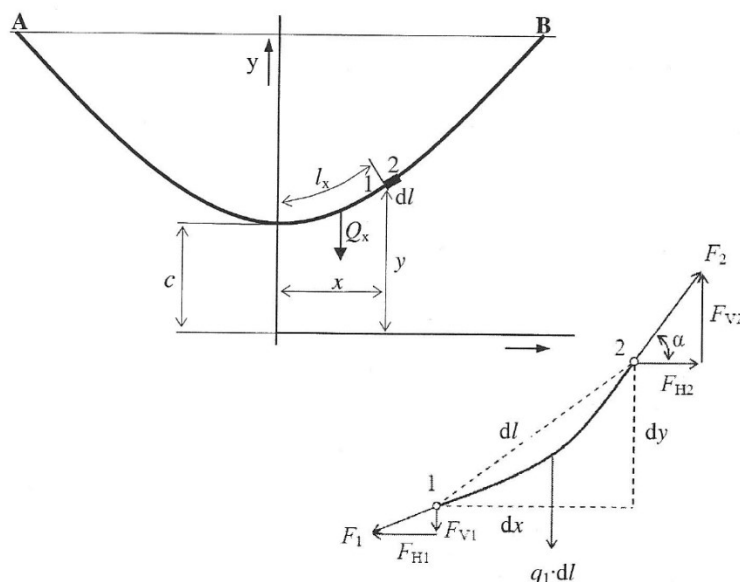
$$\sum F_y = 0, \quad F_{V2} - F_{V1} - q_1 \cdot dl = 0 \Rightarrow F_{V2} - F_{V1} = dF_V = q_1 \cdot dl \quad (5.1.2)$$

Kde F_V jsou vertikální síly v bodech 1 a 2 průhybové křivky a q_1 je vlastní váha vodiče.

Tyto podmínky jasně ukazují, že horizontální složka síly je v každém bodě průhybové křivky stejná a že vertikální složka síly v určitém bodě je stejná jako váha vodiče o příslušné délky dl .

Minimální neboli nulová síla je ve vrcholu své průhybové křivky, maximální naopak v místě zavěšení. V případě druhé podmínky můžeme vydělit dx , z čehož vznikne výraz:

$$\frac{dF_V}{dx} = q_1 \cdot \frac{dl}{dx} \quad (5.1.3)$$



Obr. 5.1 Element délky průhybové křivky [7]

Dále také můžeme z obrázku 5.1 odvodit vztah:

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (5.1.4)$$

a následným dosazení do vztahu (5.1.3) získáme výraz:

$$\frac{dF_V}{dx} = q_1 \cdot \frac{dl}{dx} = q_1 \cdot \sqrt{\frac{dx^2 + dy^2}{dx^2}} = q_1 \cdot \sqrt{1 + (y')^2} \quad (5.1.5)$$

Třetí podmínku, tedy podmínku rovnováhy momentů je možné vyjádřit rovnicí:

$$F_V \cdot dx = F_H \cdot dy \quad (5.1.6)$$

Úpravou pak:

$$F_V = F_H \cdot \frac{dy}{dx} \Rightarrow \frac{dF_V}{dx} = F_H \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \text{ a dále } \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{dy'}{dx}$$

Dostaneme rovnici:

$$\frac{dF_V}{dx} = F_H \cdot \frac{dy'}{dx} \quad (5.1.7)$$

Porovnáme-li rovnice (5.1.5) a (5.1.7) vyjde nám diferenciální rovnice průhybové křivky:

$$q_1 \cdot \sqrt{1 + (y')^2} = F_H \cdot \frac{dy'}{dx} \quad (5.1.8)$$

Další úpravou a následným integrováním vzniká:

$$\int \frac{dy'}{\sqrt{1 + (y')^2}} dx = \int \frac{q_1}{F_H} \cdot dx$$

$$\operatorname{arcsinh} y' = \frac{q_1}{F_H} \cdot (x + k_1)$$

$$y' = \sinh \left[\frac{q_1}{F_H} \cdot (x + k_1) \right] \quad (5.1.9)$$

Dalším integrováním vztahu (5.1.9) dostaneme rovnici průhybové křivky:

$$y = \frac{F_H}{q_1} \cdot \cosh \left[\frac{q_1}{F_H} \cdot (x + k_1) \right] + k_2 \quad (5.1.10)$$

Integrační konstanty k_1 a k_2 je možné určit z počátečních podmínek.

Jeli $x = 0$, pak pro derivaci y platí $y' = 0$, dále pak vyplývá, že $y = \frac{F_H}{q_1}$,

Pak tedy pro rovnice (5.1.9)

$$0 = \sinh \left(k_1 \cdot \frac{q_1}{F_H} \right) \Rightarrow k_1 = 0$$

A pro rovnici (5.1.10)

$$\frac{F_H}{q_1} = \frac{F_H}{q_1} + k_2 \Rightarrow k_2 = 0$$

Výsledný tvar rovnice průhybové křivky v případě nepružné řetězovky je

$$y = c \cdot \cosh \frac{x}{c}, \quad (5.1.11)$$

kde c je parametr řetězovky (m) a je roven $c = \frac{F_H}{q_1} = \frac{\sigma_H}{\gamma}$
 F_H je vodorovná složka tahu ve vodiči (N)
 σ_H je mechanické napětí ve vodorovném směru (Pa)
 γ je měrná váha čistého, nezátíženého vodiče ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)
 q_1 je váha jednoho metru vodiče ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$).

Za předpokladu že je vodič zatížen například námrazou, zapíšeme parametr řetězovky následujícím způsobem:

$$c = \frac{F_H}{q_1 \cdot z} = \frac{\sigma_H}{\gamma \cdot z} \quad (5.1.12)$$

Výsledná rovnice průhybové křivky neboli řetězovky, za předpokladu zatížení z (-) je

$$y = c \cdot \cosh \frac{x}{c} = \frac{\sigma_H}{\gamma \cdot z} \cdot \cosh \frac{x \cdot \gamma \cdot z}{\sigma_H} \quad (5.1.13)$$

Je nutné dodat, že parametr c je fiktivní souřadnice nejnižšího bodu řetězovky podle obr. Při přetížení $z = 1$ jsou praktické hodnoty parametru c :

Tab. 5.1 Hodnoty parametru c [8]

Materiál vodiče	Mechanické namáhání vodiče (MPa)	Parametr c (m)
Cu	200	2240
Al	80	2970
AlFe	110	3200

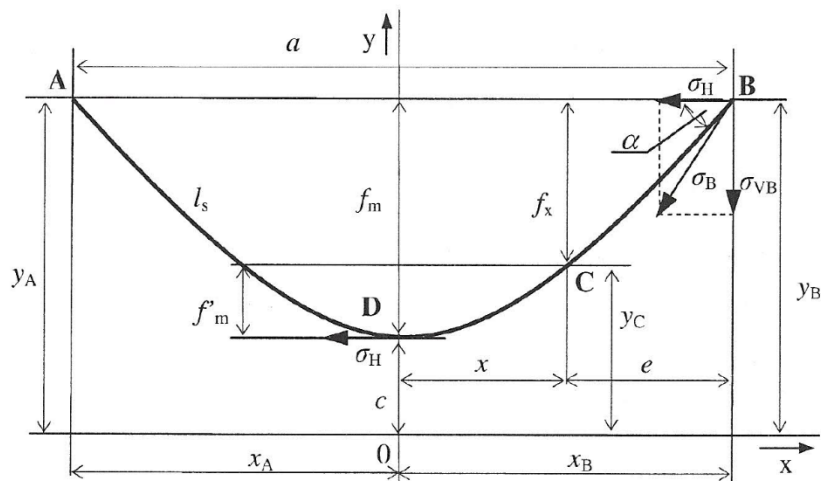
Budeme-li předpokládat, že je hmotnost vodiče rovnoměrně rozložena podél spojnice závěsných bodů, získáme rovnici průhybové křivky podle paraboly:

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot c} = \frac{x^2 \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot \sigma_H} \quad (5.1.14)$$

K tomuto výsledku je možné dojít také když rovnici (5.1.11) rozvineme v mocninou řadu a zanedbáme členy s vyššími mocninami.

Průhyb vodiče

Pomocí odvozené rovnice průhybové křivky můžeme určit polohu vodiče v libovolném místě. Aby bylo vyhověno bezpečnostním předpisům podle norem, stačí určit maximální průhyb vodiče nad zemí. V případě souměrně zavěšeného vodiče (obr. 5.2) označíme maximální průhyb f_m a průhyb v libovolném místě f_x . Vzdálenost pak mezi závěsnými body je značena jako rozpětí a . U souměrného zavěšeného vodiče je maximální průhyb v polovině rozpětí, což znamená, že do rovnice řetězovky stačí dosadit polovinu této vzdálenosti mezi závěsnými body neboli $a/2$. [7]



Obr.5.2 Souměrně zavěšený vodič [7]

$$f_m = y \cdot \left(\frac{a}{2}\right) - c = c \cdot \left(\cosh \frac{a}{2 \cdot c} - 1 \right) \quad (5.1.12)$$

Pro určení průhybu v libovolném bodě x

$$f_x = f_m + c - y(x) = c \cdot \left(\cosh \frac{a}{2 \cdot c} - \cosh \frac{x}{c} \right) \quad (5.1.13)$$

Použijeme-li rovnici průhybové křivky podle paraboly, tak maximální průhyb vodiče bude:

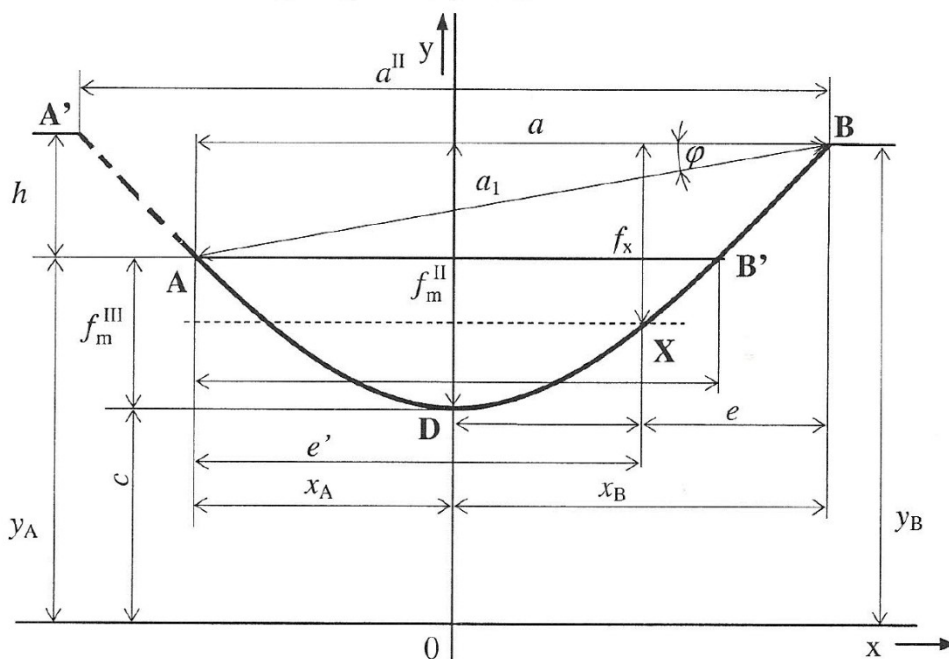
$$f_m = y \cdot \left(\frac{a}{2}\right) = \frac{a^2}{8 \cdot c} = \frac{a^2 \cdot \gamma \cdot z}{8 \cdot \sigma_H} \quad (5.1.14)$$

A v libovolném bodě:

$$f_x = f_m - y(x) = \frac{\gamma \cdot z}{8 \cdot \sigma_H} \cdot (a^2 - 4x^2) \quad (5.1.15)$$

5.1.2 Nesouměrně zavěšený vodič

Je tím myšlen vodič, který nemá závěsné body ve stejné výšce. Z této definice taky plyne, že ani vrchol průhybové křivky není uprostřed rozpětí. Pro výpočty nesouměrně zavěšeného vodiče je nejlepší metoda s použitím rovnic řetězovky, a to hlavně z důvodu, že řetězovka nabízí lepší rozložení průhybové křivky. Dále je také nutné zavést nové pojmy, jako je převýšení h , který značí rozdíl výšek závěsných bodů. Dalším je skutečná vzdálenost závěsných bodů b , které definujeme jako šikmé rozpětí. Jak už je výše uvedeno, že se u nesouměrně zavěšeného vodiče nenachází nejnižší bod uprostřed rozpětí, je potřebné řešit tuto skutečnost doplněním vodiče na ideální rozpětí a_i s vodorovnými podpěrami. Pomocí těchto úprav můžeme dále použít výše uvedené vztahy. [7]



Obr.5.3 Nesouměrně zavěšený vodič [7]

Pro vyjádření výškové rozdílu mezi sousedními závěsy platí vztah:

$$h = y_B - y_A = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} - c \cdot \cosh \frac{x_A}{c} \quad (5.1.16)$$

Následně pomocí rozkladu hyperbolických funkcí, které jsou podrobně rozepsány v literatuře [7] dostáváme výraz:

$$\frac{h}{2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c}} = \sinh \left(\frac{x_B}{c} - \frac{a}{2 \cdot c} \right) \quad (5.1.17)$$

Podle obrázku (5.3) určíme, že $a = x_B - x_A$, $a_i = 2 \cdot x_B$ a upravíme rovnici (5.1.17) na:

$$\frac{h}{2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c}} = \sinh \frac{a_i - a}{2 \cdot c} \quad (5.1.18)$$

A z této rovnice vyjádříme výsledné rozpětí:

$$a_i = 2 \cdot x_B = a + \frac{2 \cdot c \cdot h}{a} \quad (5.1.19)$$

Dále určíme souřadnici závěsného bodu x_B

$$x_B = \frac{a}{2} + \frac{c \cdot h}{a} \quad (5.1.20)$$

A následně x_A

$$x_A = a - x_B = \frac{a}{2} - c \cdot \frac{h}{a} \quad (5.1.21)$$

V praxi dochází k tomu, že ve svahu s velkým sklonem, při extrémně nízkých teplotách dochází k situaci, že vodič svým tahem nadzvedává izolátor. K zamezení tohoto jevu, je vhodné zatížit izolátor závažím, nebo uchytit zespodu dalším izolátorem. [8]

5.1.3 Délka vodiče mezi závěsnými body

Skutečnou délku vodiče můžeme určit pomocí křivkového integrálu pro průhybovou křivku dle řetězovky.

$$l_s = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \sqrt{1 + (y')^2} \cdot dx \quad (5.1.22)$$

Pomocí hyperbolických funkcí a úprav z literatury [5] následně vzniká vztah:

$$l_s = 2 \cdot \int_0^{\frac{a}{2}} \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{x}{c}} \cdot dx = \int_0^{\frac{a}{2}} \sqrt{\cosh^2 \frac{x}{c} - \sinh^2 \frac{x}{c} + \sinh^2 \frac{x}{c}} \cdot dx = 2 \cdot \int_0^{\frac{a}{2}} \cosh \frac{x}{c} \cdot dx$$

Řešením této rovnice stanovíme délku vodiče mezi dvěma závěsnými body pomocí řetězovky.

$$l_s = 2 \cdot c \cdot \left[\sinh \frac{x}{c} \right]_0^{\frac{a}{2}} = 2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c} \quad (5.1.23)$$

Délka vodiče podle paraboly při souměrných závěsech pak je

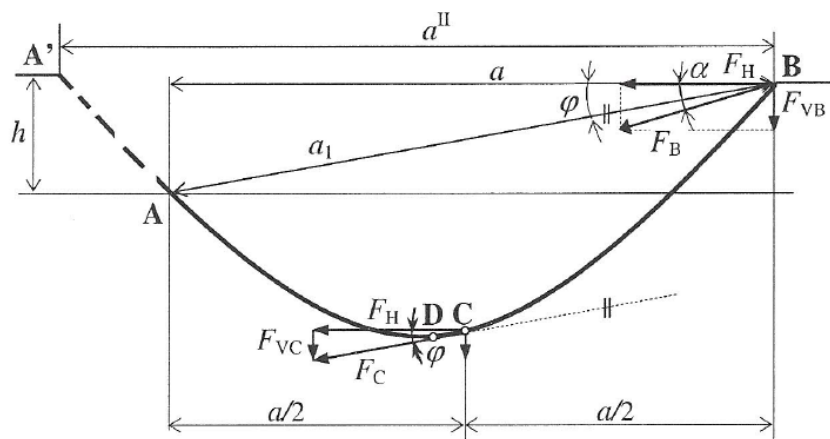
$$l_s = a + \frac{a^3}{24 \cdot c^2} \quad (5.1.24)$$

Pro vyjádření délky u nesouměrné řetězovky lze použít stejný vztah jako u souměrného zavěšení, ovšem s jinými integračními mezemi. Výsledkem po integraci pak bude vztah. [7]

$$l_s = c \cdot \sinh \frac{x_B}{c} + c \cdot \sinh \frac{x_A}{c} \quad (5.1.25)$$

5.1.4 Namáhání vodiče a závěsů

Pro mechanické napětí v závěsných bodech A a B platí, že vodorovná složka síly, která působí na vodič, je u souměrného i nesouměrného závěsu konstantní. Ovšem v případě nesouměrného zavěšení pro svislou složku síly platí, že namáhání je v závěsných bodech rozdílné. [8]



Obr.5.4 Nesouměrný vodič – učení vertikálních sil [7]

Vztah pro svislou složku síly bude:

$$F_{VA} = l_A \cdot (q_1 + q_2), \quad \text{resp.} \quad F_{VB} = l_B \cdot (q_1 + q_2) \quad (5.1.26)$$

A pro mechanické napětí platí vztah:

$$\sigma_{VA} = l_A \cdot \gamma \cdot z, \quad \text{resp.} \quad \sigma_{VB} = l_B \cdot \gamma \cdot z \quad (5.1.27)$$

Vzdálenosti l_A a l_B jsou délky větví řetězovky od příslušného závěsného bodu po vrchol řetězovky.

Pro svislou složku síly na závěsných bodech lze také zapsat vztahy:

$$F_{VA} = \frac{a}{2} \cdot (q_1 + q_2) - F_{VC} \quad (5.1.28)$$

$$F_{VB} = \frac{a}{2} \cdot (q_1 + q_2) + F_{VC} \quad (5.1.29)$$

Z těchto vztahů plyne, že svislá složka síly ve vyšším závěsném bodě B, je rovna součtu rozdílů tíhy polovičního rozpětí a svislé složky síly, pro kterou platí vztah: [7]

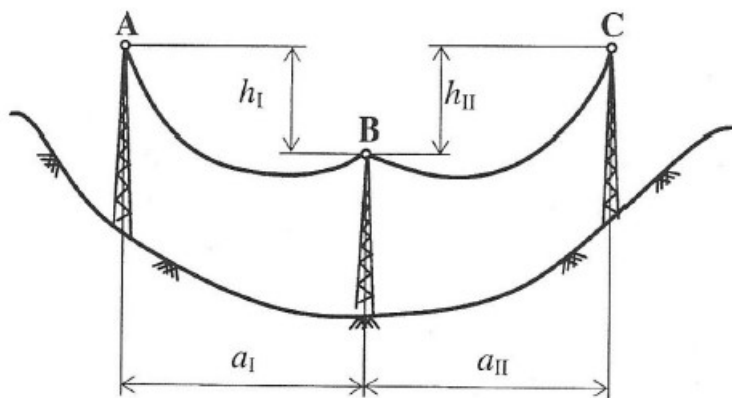
$$F_{VC} = F_H \cdot \operatorname{tg} \varphi = F_H \cdot \frac{h}{a} \quad (5.1.30)$$

Takže vztahy (5.1.28) s (5.1.29) upravíme na výsledný tvar rovnice pro určení svislé složky tahu v závěsných bodech

$$F_{VA} = \frac{a}{2} \cdot (q_1 + q_2) - F_H \cdot \frac{h}{a} \quad (5.1.31)$$

$$F_{VB} = \frac{a}{2} \cdot (q_1 + q_2) + F_H \cdot \frac{h}{a} \quad (5.1.32)$$

Z těchto rovnic vyplývá, že v praxi může nastat problém tzv. utopeného stožáru. To znamená, že se vrchol řetězovky nachází mimo závěsné body (obr.5.4) čímž dostáváme zápornou svislou sílu. V důsledku toho může dojít k překlpení izolátorových závěsů nad konzoli. Pro řešení této situace je potřebné určit svislou složku síly na stožáru B. [7]



Obr.5.4 Utopený stožár [7]

Svislá složka síly od rozpětí I resp. II je dána

$$F_{VBI} = \frac{a_I}{2} \cdot (q_1 + q_2) - F_H \cdot \frac{h_I}{a_I}, \text{ resp. } F_{VBII} = \frac{a_{II}}{2} \cdot (q_1 + q_2) - F_H \cdot \frac{h_{II}}{a_{II}} \quad (5.1.33)$$

Celková svislá složka síly pro závěs B je dána součtem těchto

$$F_{VB} = F_{VBI} + F_{VBII} = \frac{1}{2} \cdot (a_I + a_{II}) \cdot (q_1 + q_2) - F_H \cdot \left(\frac{h_I}{a_I} + \frac{h_{II}}{a_{II}} \right) \quad (5.1.34)$$

Znaménko před F_H , se bude měnit v závislosti na poloze závěsných bodů A a C vůči závěsnému bodu B. Na obrázku (5.4) jsou závěsné body A a C výš, znaménko v rovnici (5.1.34) je tedy správně.

5.2 Stavová rovnice vodiče

Mechanický stav vodiče je určen třemi stavovými veličinami a to namáháním σ_H , přetížením z a teplotou ϑ . Přetížení je někdy nahrazeno tzv. relativním rozpětím. Změnou teploty nebo změnou přetížení se změní namáhání vodiče. Tuto vzájemnou souvislost vyjadřuje stavová rovnice, která dále slouží k vytvoření montážních tabulek, podle kterých se pak vodiče napínají při montáži vedení.

Následující rovnice jsou odvozeny z literatury [7,8] a [9]. Indexy 1 označují výchozí stav a indexy 2 stav nový.

Zvýší-li se teplota z ϑ_1 na ϑ_2 , můžeme předpokládat, že se souměrně zavěšený vodič prodlouží o délku:

$$\Delta l_{\vartheta} = l_1 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (5.2.1)$$

Ovšem prodloužení vodiče se sníží namáhání

$$\Delta l_{\sigma} = \frac{l_1}{E} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (5.2.2)$$

Celková změna délky je pak

$$\Delta l = \Delta l_{\vartheta} - \Delta l_{\sigma} = l_1 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \frac{l_1}{E} \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (5.2.3)$$

Podle rovnice (5.1.24) bude délka vodiče při teplotě ϑ_1 a ϑ_2 rovna

$$l_1 = a + \frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} \quad \text{resp.} \quad l_2 = a + \frac{a^3}{24 \cdot c_2^2} \quad (5.2.4)$$

Takže celkové prodloužení vodiče lze také zapsat jako

$$\Delta l = l_2 - l_1 = \frac{a^3}{24 \cdot c_2^2} - \frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} \quad (5.2.5)$$

Spojením rovnic (5.2.5) a (5.2.3) celkové změny délky, dostáváme výraz

$$\frac{a^3}{24 \cdot c_2^2} - \frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} = l_1 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \frac{l_1}{E} \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (5.2.6)$$

Dále nahradíme parametr c a rovnici upravíme

$$\frac{a^3 \cdot (\gamma \cdot z_2)^2}{24 \cdot \sigma_2^2} - \frac{a^3 \cdot (\gamma \cdot z_1)^2}{24 \cdot \sigma_1^2} = l_1 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \frac{l_1}{E} \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (5.2.7)$$

Je-li průhybová křivka nahrazena parabolou, lze uvažovat o zjednodušení že $l_1 \cong a$, pak bude platit následující rovnice

$$\frac{a^2 \cdot (\gamma \cdot z_2)^2}{24 \cdot \sigma_2^2} - \frac{a^2 \cdot (\gamma \cdot z_1)^2}{24 \cdot \sigma_1^2} = \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (5.2.8)$$

Dále vynásobíme-li výrazem $E \cdot \sigma_2^2$ vznikne

$$E \cdot \frac{a^2 \cdot (\gamma \cdot z_2)^2}{24} - \frac{a^2 \cdot (\gamma \cdot z_1)^2}{24 \cdot \sigma_1^2} \cdot E \cdot \sigma_2^2 = \alpha \cdot E \cdot \sigma_2^2 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \sigma_2^2 \cdot (\sigma_2 - \sigma_1)$$

$$\sigma_2^3 + \sigma_2^2 \cdot \left[\frac{\gamma^2 \cdot E}{24} \cdot \left(\frac{a \cdot z_1}{\sigma_1} \right)^2 + \alpha \cdot E \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) - \sigma_1 \right] = \frac{\gamma^2 \cdot E}{24} \cdot (a \cdot z_2)^2 \quad (5.2.9)$$

Jelikož α, γ a E jsou materiálové konstanty dané vodičem, lze rovnici ještě zjednodušit na tvar

$$\sigma_2^3 + \sigma_2^2 \cdot \left[A \cdot \left(\frac{a \cdot z_1}{\sigma_1} \right)^2 + B \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) - \sigma_1 \right] = A \cdot (a \cdot z_2)^2 \quad (5.2.10)$$

Kde $A = \frac{\gamma^2 \cdot E}{24}$ a $B = \alpha \cdot E$

V rovnicích bylo použito značení

l_1 – je délka vodiče při počáteční teplotě ϑ_1 (m)

α – koeficient teplotní roztažnosti

σ_n – mechanické napětí (MPa)

E – modul pružnosti materiálu (MPa)

γ – měrná hmotnost vodiče ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)

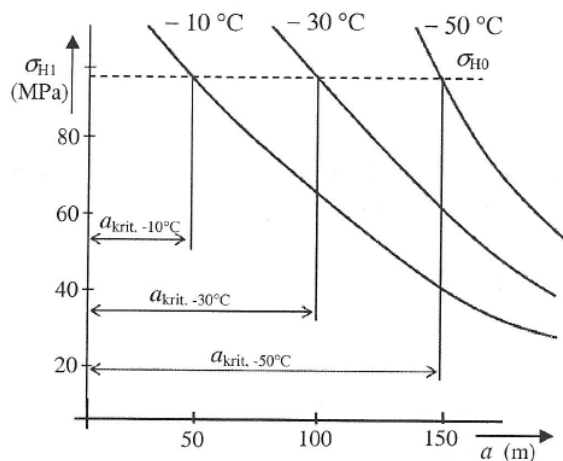
z – přetížení vodiče

Jak už bylo řečeno v úvodu, stavová rovnice slouží k vytvoření montážních tabulek. Dále je pak možné ze stavové rovnice určit další důležité údaje, jako je kritické rozpětí a kritická teplota.

5.3 Kritické rozpětí a kritická teplota

Je-li rozpětí vedení větší než 50 metrů, stanovuje norma ČSN 33300 nutnost kontrolovat mechanické napětí, aby při zvětšeném námrazku nedocházelo k přesáhnutí 55% pevnosti. Toho lze dosáhnout tak, že pomocí stavové rovnice (5.2.8) pro teplotu -5°C , změnu přetížení ze z_1 na $z_2 = z_k$ a změnu namáhání ze σ_1 na $\sigma_z = 0,55 \cdot \sigma_p$ stanovíme kritické rozpětí. [8]

$$a_k = \sqrt{\frac{24}{E \cdot \gamma^2}} \cdot \sqrt{\frac{0,55 \cdot \sigma_p - \sigma_1}{\left(\frac{z_k}{0,55 \cdot \sigma_p} \right)^2 - \left(\frac{z_1}{\sigma_1} \right)^2}} \quad (5.3.1)$$



Obr.5.5 závislost mechanického napětí od rozpětí, určení kritického rozpětí [7]

Kritická teplota je teplota, při níž je stejný průhyb jako při -5°C a normálním námrazku, tedy

$$f = \frac{a^2 \cdot \gamma \cdot z_1}{8 \cdot \sigma_1} = \frac{a^2 \cdot \gamma}{8 \cdot \sigma_k} \quad (5.3.2)$$

S využitím stavové rovnice lze určit kritickou teplotu

$$\vartheta_k = \frac{\sigma_1}{\alpha \cdot E} \cdot \frac{z_1 - 1}{z_1} - 5 \quad (5.3.3)$$

Podle literatury [5] mohou řešením této rovnice nastat tyto případy

$\vartheta_k > 40^{\circ}\text{C}$, tehdy he maximální průhyb při -5°C a přetížení

$\vartheta_k = 40^{\circ}\text{C}$, maximální průhyb je při -5°C a přetížení a je rovný průhybu při $+40^{\circ}\text{C}$

$\vartheta_k < 40^{\circ}\text{C}$, maximální průhyb je při 40°C

Tyto informace jsou důležité jak při projektování, tak stavbě venkovního vedení, protože je nutné určit při jakých povětrnostních podmínkách bude maximální průhyb, tedy kdy bude vodič nejbližší k zemi.

6. Modernizace linky ZVN

6.1 Důvody modernizace

Rostoucí poptávka po elektrické energii, otevření trhu s elektrickou energií, integrací nových zdrojů do elektrizačních soustav a nutnost respektovat životní prostředí mají často za následek, že stávající linky přenosových soustav jsou provozovány a zatěžovány blízko svých tepelných, elektrických či mechanických limitů a občas i za hranicemi svých přenosových schopností. Obchod s elektrickou energií na otevřeném trhu a požadavky dodavatelů a zákazníků často nerespektují fyzikální zákony pro toky elektřiny, příkladem jsou tzv. kruhové tok výkonů mezi jednotlivými částmi rozsáhlých soustav nebo dokonce mezi soustavami několika států, které vznikají rozdílnou přenosovou schopností očekávaných tras. To může vyvolat nadměrné zatížení mezinárodních propojení či klíčových vnitrostátních profilů, čímž může dojít k omezení přenosové kapacity, která je určena pro jiné využití. Problémem také zůstává, že se mnoho výrobních kapacit nachází poměrně daleko od míst největší spotřeby elektrické energie. Rostoucí požadavky na přenosy výkonů by měl doprovázet proces výstavby nových přenosových tras, případně zvýšení přenosových schopností tras stávajících na základě obnovy či náhrady prvků jednotlivých soustav, což by přispělo k zachování přijatelnější úrovně spolehlivosti dodávky elektrické energie i zajištění přenosové kapacity potřebné při nárustu zatížení. Mezi soustavami i uvnitř nic neexistuje řada úzkých míst, kde za nejrůznějších podmínek bývá dosahováno limitů přenosové schopnosti. [9]

Spolehlivým řešením řady problému v přenosových a distribučních soustavách by byla výstavba nových vedení, která je však velmi obtížná, někde téměř nemožná, a to z důvodu ekologických a územních. Výstavba nových linek obvykle nedokáže držet krok s rostoucím výkonem elektráren i poptávkou po elektrické energii. Pro ekonomický, spolehlivý a bezpečný provoz stávajících sítí je nutné zavádět nové technologie a principy řízení elektrizačních soustav. Potřeba inovativních mechanismů postupně narůstá. Řešením mohou být nejrůznější metody, postupy, a technologie pro řízení výkonových toků v soustavách.

6.2 Modernizace vedení V402

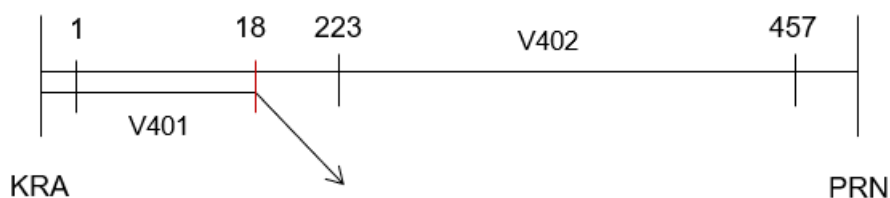
Jedná se o přenosovou linku, která byla vystavěna v roce 1960 pro přenos elektrické energie z rozvodny v Krasíkově, směrem jihovýchodně kolem Olomouce do rozvodny Prosenice.

Rozvodna Krasíkov je důležitým rozvodným uzlem pro východní Čechy. Je skrze přenosovou soustavu přímo spojena s přečerpávací elektrárnou Dlouhé Stráně. Tato elektrárna je důležitým pohotovostním zdrojem s instalovaným výkonem 650 MW, který lze využít v případě úplného blackoutu. Z rozvodny jsou dále vyvedeny linky V401 směr Týnec, linka V453 vyvedena severozápadně do rozvodny Neznášov, kterou jsou dále napájeny severní Čechy. Následuje vedení V458 do rozvodny v H. Živicích v oblasti severního Slezska.

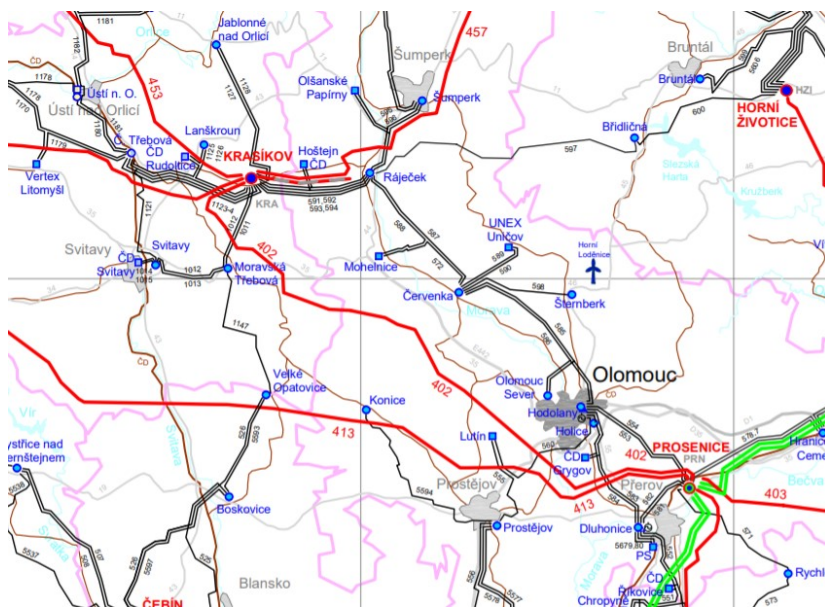
Z Prosenické rozvodny vedou čtyři linky zvlášť vysokého napětí 400kV do rozveden Otrokovice, Nošovice, Řeporyje a výše už zmíněnou rozvodnu Krasíkov. Přes Prosenice navíc vedou linky pro přenos na napěťové hladině 220 kV. Linka V402 tedy propojuje dva důležité přenosové uzly,

významné pro sever a střed Moravy a Slezsko. Rozvodna Krasíkov je tedy významným uzlem rozvodu elektrické energie, na okraji Čech a Moravy.

Vedení V402 se skládá ze dvou částí. První je dvojité vedení, které je společné s vedením V401 v úseku od TR Krasíkov ke stožáru č. 18, kde jsou použity stožáry typu Dunaj. Délka tohoto vedení je 5724 m. Druhou částí je jednoduché vedení v úseku od stožárů č. 18 k TR Prosenice s celkovým počtem 235 stožárů typu Portál. Celková délka obou částí vedení je 87 570 m. Na vedení je namontovaný jeden systém vodičů 3x 3x 362-AL1/59-ST1A, zemnicí lano 1x 185-AL1/43-ST6C a zemnicí lano s optickými vlákny 1x 159-AL3/44-A20SA s 48 vlákny. Ochrana před nebezpečným dotykem živých částí je polohou a rychlým odpojením v případě dotyku neživých částí. Přenosová schopnost tohoto vedení je 2000 A.



Obr.6.1 Schéma V402



Obr. 6.2. Vedení V402

Modernizace spočívá v kompletní výměně vedení od demontáže stávajícího vedení až po montáž nových stožárů a vodičů. Ve spolupráci se společností ČEPS Invest, jsem vypracoval budoucí podobu přenosové linky V402/802. Společnost ČEPS Invest mi také poskytla software pro vytvoření projekčních tabulek dvou kotevních úseku, které jsou popsány níže.

6.3 Vodiče a stožáry

Původní stožárové konstrukce typu portál, budou nahrazeny stožáry Dunaj, jejichž popis je v příloze (A). Základní výška stožárů Dunaj je 46 metrů, což je vzdálenost od patky stožáru po nejvyšší bod. Převážně se používá pro dvojité vedení, tedy 2x 400kV. Aby nebyly porušeny předpisy o bezpečné vzdálenosti vedení od okolní infrastruktury, provádí se navýšení stožárů o 2, 4, 6 až 8 metrů. Konstrukce Dunaj dovoluje použití vodiče s větším průřezem, než jak tomu je u stávajících stožárů Portál. U nových stožárů typu Portál je možno použít stejné vodiče.

Stávající vodiče 362-AL1/59-ST1A budou nahrazeny vodiči 490-AL1/64-ST1A, které mají při uvažování trojsvazku přenosovou schopnost (3x815A) 2445 A. Duše nového vodiče je tvořena z pozinkovaných ocelových drátů s průřezem přibližně 64 mm². Plášť je vyroben z tří vrstev hliníkových drátů o celkovém průřezu 490 mm². Celkový průměr lana je 30,6 mm s průřezem 553,8 mm².

6.4 Vybrané kotevní úseky

Pro znázornění rozdílných mechanických parametrů, které jsou ovlivněny zejména atmosférickými podmínkami, jsem vybral dva kotevní úseky. První úsek vedení se nachází přibližně 20 km od rozvodny Krasíkov mezi obcemi Gruna a Linhartice. Kotevní úsek je mezi stožáry č.262-265 a je dlouhý 1255 m s převýšením asi 50 m. Nachází se v námrazové oblasti I-1 a lze ho také definovat větrnou oblastí II, se základní rychlostí větru 25 m/s. Tuto část vedení značím jako kotevní úsek A.

Druhý úsek vedení se nachází zhruba o 4 kilometry dále směrem k rozvodně v Prosenicích. Tento úsek vedení leží mezi stožáry č.277-281. Nachází se v námrazové oblasti I-2 a větrné oblasti III s průměrnou rychlostí větru 27,5 m/s. Tuto část značím jako kotevní úsek B.

6.5 Kotevní úsek A

Jak již bylo zmíněno, tak tento úsek leží v námrazové oblasti I-1. Střední délku rozpětí L_R jsem vypočítal 313,8 m. Zvolil jsem referenční tah t o velikosti 31,5 kN. Při použití vodiče s průřezem 553,83 mm², je mechanické napětí $\sigma = 56,88$ MPa. Při teplotě -5 °C a kombinovaném zatížení extrémní námrazou a větrem jsem dostal hodnotu tahu ve vodiči $t = 49,62$ kN, při parametru řetězovky c 1722 m a přídatné zatížení vodiče $z = 1,832$. Podmínka pro pevnost vodiče (55 % RTS), tedy 82,95 kN byla splněna.

Tab. 6.1. Projekční tabulka kotevního úseku A

T	(°C)	-30	-20	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	55
l	(Nm ⁻¹)	0	0	0	0	11,59	0	11,59	4,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tl. n.	(mm)	0	0	0	0	16,11	0	16,11	7,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v _h	(ms ⁻¹)	0	0	0	0	0	31,01	16,7	21,93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q _w	(Nm ⁻¹)	0	0	0	0	0	23,15	15,16	18,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
τ	(°)	0	0	0	0	0	51°41'	26°54'	39°43'	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z	(-)	1	1	1	1	1,634	1,613	1,832	1,588	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
σ	(MPa)	65,85	61,92	58,45	56,88	82,32	81,55	89,60	80,62	55,40	52,69	50,28	48,13	46,19	44,45	42,86	41,42	40,10	43,64
t	(kN)	36,47	34,29	32,37	31,50	45,59	45,16	49,62	44,65	30,68	29,18	27,85	26,65	25,58	24,62	23,74	22,94	22,21	24,17
c	(m)	1994	1874	1770	1722	1526	1531	1481	1537	1677	1595	1522	1457	1398	1346	1298	1254	1214	1321

T	(°C)	-30	-20	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	55
284,4		5,07	5,40	5,72	5,88	6,63	6,61	6,83	6,58	6,03	6,34	6,65	6,94	7,24	7,52	7,80	8,07	8,34	7,66
349,4		7,66	8,15	8,63	8,87	10,01	9,98	10,32	9,94	9,11	9,58	10,04	10,49	10,93	11,36	11,78	12,19	12,59	11,57
296,4		5,51	5,86	6,21	6,38	7,20	7,18	7,42	7,15	6,55	6,89	7,22	7,54	7,86	8,17	8,47	8,77	9,06	8,32

6.6 Kotevní úseku B

Druhý kotevní úsek leží v námrazové oblasti I-2. Střední délku rozpětí LR jsem vypočítal 290,9 m. Referenční tah byl zvolen o velikosti 31,3 kN a při stejném průřezu, jako v kotevním úseku A, je referenční mechanické napětí σ rovno 56,15 MPa. Pro teplotu -5 °C a současné působení extrémní námrazy a větru jsem vypočítal parametr řetězovky c, který je 1308 m a dále pak hodnotu maximálního tahu $t = 62,4$ kN, přídavné zatížení vodiče je $z = 2,609$. Podmínka pro pevnost vodiče byla také splněna.

Tab. 6.2 Projekční tabulka kotevního úseku B

T	(°C)	-30	-20	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	55
l	(Nm ⁻¹)	0	0	0	0	23,10	0	23,10	8,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tl. n.	(mm)	0	0	0	0	26,34	0	26,34	12,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v _h	(ms ⁻¹)	0	0	0	0	0	33,96	18,29	24,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q _w	(Nm ⁻¹)	0	0	0	0	0	27,36	23,75	27,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
τ	(°)	0	0	0	0	0	56°14'	29°51'	45°46'	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z	(-)	1	1	1	1	2,263	1,799	2,609	2,067	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
σ	(MPa)	66,04	61,68	57,87	56,15	101,81	86,34	112,67	95,42	54,54	51,62	49,04	46,76	44,72	42,90	41,26	39,77	38,42	42,06
t	(kN)	36,58	34,16	32,05	31,10	56,38	47,82	62,40	52,85	30,21	28,59	27,16	25,90	24,77	23,76	22,85	22,03	21,28	23,29
c	(m)	1999	1867	1752	1700	1362	1453	1308	1398	1651	1563	1485	1416	1354	1299	1249	1204	1163	1273

T	(°C)	-30	-20	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	55
211,6		2,80	3,00	3,20	3,29	4,11	3,85	4,28	4,01	3,39	3,58	3,77	3,96	4,14	4,31	4,48	4,65	4,81	4,40
228,7		3,27	3,50	3,73	3,85	4,80	4,50	5,00	4,68	3,96	4,19	4,41	4,62	4,83	5,04	5,24	5,43	5,63	5,14
278,7		4,86	5,20	5,54	5,71	7,13	6,69	7,43	6,95	5,88	6,22	6,54	6,86	7,18	7,48	7,78	8,07	8,36	7,63
371,4		8,63	9,24	9,85	10,15	12,68	11,88	13,21	12,36	10,45	11,05	11,63	12,20	12,75	13,30	13,83	14,35	14,85	13,57

6.7 Výpočet elektrických parametrů vedení

Pro výpočet elektrických parametrů vycházím z vlastností vodičů, které jsou popsány v příloze (A) a (B). V příloze (C) a (D) jsou pak popsány rozměry stožárů typu Portál a Dunaj, ze kterých jsou určeny vzájemné vzdálenosti mezi vodiči, pro výpočet indukčních reaktancí vedení. Dále pak pro výpočet kapacity vedení je použita metoda zrcadlení. Vzhledem k tomu, že vodič není na stožáru zavěšen v rovnoměrné vzdálenosti od země, ale jeho výška roste a klesá od polohy závěsného bodu

k bodu maximálního průhybu. Podle norem je minimální výška nad zemí 12 metrů. Je tedy pro co nepřesnější výsledek nutné určit přibližnou vzdálenost vodiče nad zemí neboli náhradní průměrnou střední hodnotu vzdálenosti vodiče nad zemí, která respektuje i různé navýšení jednotlivých stožárů, které jsou u vedení použity.

Určené hodnoty pro výpočet jsou následující: celkový průřez lana 361,9 mm², měrný odpor vodiče $A_1 = \frac{1}{33} \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$, průměr vodiče $d = 26,7$ mm. Uvažuji, že vodiče jedné fáze jsou v symetrickém trojsvazku se vzdáleností $a = 350$ mm, Vzdálenost mezi fázemi je pak u stožáru typu portál $a_{12} = 12$ m, $a_{13} = 24$ m, $a_{23} = 12$ m a $b_{12} = b_{23} = b_{13} = 0$ m. Vzdálenost vodiče nad zemí uvažuji $a = b = c = 20,5$ m. Následně pak vzdálenost mezi vodiči a zrcadlenými vodiči $A_{12} = 12$ m, $A_{23} = 12$ m, $A_{13} = 24$ m a $B_{12} = B_{23} = B_{13} = 41$ m.

Odpor jednoho vodiče:

$$R_k = \rho \cdot \frac{l}{S} = \frac{1000}{33 \cdot 361,9} = 0,0837 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Odpor jednoho vodiče u trojsvazku:

$$R = \frac{R_k}{3} = \frac{0,0837}{3} = 0,0279 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Ekvivalentní poloměr:

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot a^2} = \sqrt[3]{\frac{26,7}{2} \cdot 350^2} = 117,81 \text{ mm}$$

Vzdálenost vodičů:

$$d_{12} = \sqrt{a_{12}^2 + b_{12}^2} = \sqrt{12^2 + 0^2} = 12 \text{ m}$$

$$d_{23} = \sqrt{a_{23}^2 + b_{23}^2} = \sqrt{12^2 + 0^2} = 12 \text{ m}$$

$$d_{13} = \sqrt{a_{13}^2 + b_{13}^2} = \sqrt{24^2 + 0^2} = 24 \text{ m}$$

Střední vzdálenost vodičů:

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} = \sqrt[3]{12 \cdot 24 \cdot 12} = 15,11 \text{ m}$$

Indukčnost vedení:

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r_e} + \frac{0,05}{3} = 0,46 \cdot \log \frac{15,11}{117,8 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,05}{3} = 0,986 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

Reaktance vedení:

$$X_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,986 \cdot 10^{-3} = 0,309 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Vzdálenost vodičů nad zemí:

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} = \sqrt[3]{20,5 \cdot 20,5 \cdot 20,5} = 20,5 \text{ m}$$

Vzdálenost obrazů vodičů:

$$D_{12} = \sqrt{A_{12}^2 \cdot B_{12}^2} = \sqrt{12^2 + 41^2} = 42,72 \text{ m}$$

$$D_{23} = \sqrt{A_{23}^2 \cdot B_{23}^2} = \sqrt{12^2 + 41^2} = 42,72 \text{ m}$$

$$D_{13} = \sqrt{A_{13}^2 \cdot B_{13}^2} = \sqrt{24^2 + 41^2} = 47,5 \text{ m}$$

Střední vzdálenost obrazu vodičů:

$$D_s = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} = \sqrt[3]{42,72 \cdot 42,72 \cdot 47,5} = 44,25 \text{ m}$$

Kapacita vedení:

$$C_k = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s}{r_e} \cdot \frac{2 \cdot m}{D_s}} = \frac{0,0242}{\log \frac{15,11}{0,1178} \cdot \frac{2 \cdot 20,5}{44,25}} = 12,39 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Susceptance vedení:

$$B_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_k = 3,661 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

Hodnota svodové vodivosti pro 400 kV, určena podle tabulky (1.1):

$$G_k = 0,017 \mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$$

Z vypočtených hodnot lze určit přirozený výkon a vlnovou impedanci:

Vlnová impedance:

$$\overline{Z}_V = \sqrt{\frac{\overline{Z}_K}{\overline{Y}_K}} = \sqrt{\frac{R_k + jX_k}{G_k + jB_k}} = \sqrt{\frac{0,0279 + j0,309}{0,17 \cdot 10^{-6} + j3,661 \cdot 10^{-6}}} = 290,88 - j12,4 = 291,15 \Omega$$

Přirozený výkon:

$$\overline{S}_p = \frac{U_{2n}^2}{\overline{Z}_V} = \frac{(400 \cdot 10^3)^2}{291,15} = 549,5 \text{ MVA}$$

Obdobně jsou spočítány elektrické parametry pro vodič 490 - AL1/64 - ST1A, který je použit u stožárů typu Dunaj, výsledné hodnoty jsou v následující tabulce.

Tab.6.3 Porovnání elektrických parametrů

	Stávající vedení	Modernizované vedení
Stožárová konstrukce	Portál	Dunaj
Vodič	362 - AL1/59 - ST1A	490 - AL1/64 - ST1A
Podélná impedance Ω/km	$0,0279 + j0,309$	$0,0206 + j0,2912$
Příčná admitance $\mu\text{S}/\text{km}$	$0,017 + j3,661$	$0,017 + j3,926$
Vlnová impedance (Ω)	$290,88 - j12,4$	$272,53 - j9,037$
Přirozený výkon (MVA)	549,5	586,8

6.8 Ekonomické zhodnocení

Modernizace stávajících vedení je finančně náročný proces, konečná cena celé modernizace může převýšit cenu, která byla stanovena při projektování. V následující tabulce jsem vypracoval orientační seznam cen pro materiál a montáže. Na betonáž nosného stožáru uvažuji přibližně 80 m^3 betonu. Pro kotevní stožár to je 170 m^3 . Na výrobu jednoho nosného stožáru je potřeba přibližně 24 tun oceli, u kotevního 40 tun. Celý izolátorový závěs je tvořen ze tří keramických izolátoru, do jejich ceny jsou zahrnuty i ceny armatur. Pro stožárovou konstrukci je použito 18 vodičů, tři trojsvazky u dvojitého vedení. Dále je použito jedno zemní lano a jedno kombinované zemní lano. Cena armatur pro jejich upevnění je souhrnně za celé vedení dalších 25 mil. Kč. Všechny vedlejší rozpočtové náklady jsou zhruba 8 % z celkového součtu cen materiálu. Co se týče montáží, tak jejich cena přibližně odpovídá ceně materiálu.

Tab. 6.4 Ceny materiálu a montáží pro modernizovanou linku V402

Ocelová konstrukce stožárů	478 656 000 Kč
Betonáž	56 352 000 Kč
Izolátorové závěsy	290 793 600 Kč
Fázové vodiče	244 125 000 Kč
Zemní lano	8 050 000 Kč
Kombinované zemní lano	21 000 000 Kč
Cena ostatních armatur	25 000 000 Kč
Vedlejší rozpočtové náklady	89 918 000 Kč
Celková cena materiálu	1 213 894 600 Kč
Montážní práce	1 213 890 000 Kč
Celková cena	2 427 784 600 Kč

7. Závěr

V teoretické části jsou představeny základní elektrické parametry venkovních vedení, které je třeba uvažovat při řešení provozních stavů. V druhé kapitole je rozebrán současný stav přenosové soustavy, která přenáší výkon do distribučních soustav, která dále dodává energii ke spotřebitelům. Vzhledem k tomu, jsem se v této práci zabýval modernizací přenosové linky, jsou ve třetí kapitole rozebrány typy stožárů pro vn, vvn a zvn. Také je uvedeno rozdělení stožárů podle použití pro vedení jednoduchá a dvojítá.

Významnou část teoretického oddílu práce tvoří vliv klimatických vlivů na vlastnosti vedení. Jsou zde uvedeny vztahy pro výpočet zatížení vodiče vlivem větru, námrazy a také kombinace těchto jevů. Kombinace těchto podmínek může způsobit až několikanásobné zvýšení zatížení vodiče oproti ideálnímu stavu. Proto je odolnost vůči námraze a větru jedna z nejdůležitějších věcí při návrhu vedení.

Poslední část teorie se zabývá mechanikou samotného vodiče. V této kapitole je provedeno odvození průhybové křivky podle řetězovky. Také je zde zmíněn případ nesouměrně zavěšeného vodiče, s čímž se v praxi setkáme nejčastěji. Jde o situaci, kdy nejsou oba závěsné body ve stejné nadmořské výšce. Dále tato kapitola obsahuje stavovou rovnici napnutého vodiče. Stavová rovnice vyjadřuje vliv změny teploty a atmosférických vlivů na mechanické napětí ve vodiči. Mechanický výpočet realizujeme pro nejnepríznivější případ, který může nastat. To znamená pro takové podmínky, kdy nastává největší průhyb, tedy nejmenší vzdálenost od země resp. od okolních objektů.

V praktické části diplomové práce jsem se zabýval modernizací konkrétní přenosové linky zvláště vysokého napětí. Vybral jsem dva kotevní úseky, z různých námrazových a větrných oblastí, abych zdůraznil rozdílné mechanické parametry těchto úseků. Z projekčních tabulek vyplývá, že tahy ve vodičích, tedy zatížení kotevních stožárových konstrukcí při maximálním zatížení námrazy a větru jsou zhruba o 25% větší. U prvního kotevního úseku je maximální zatížení $z = 1,8$ s maximálním tahem 49,4 kN, u druhého kotevního úseku je zatížení z rovno 2,6 a hodnota maximálního tahu 62,4 kN.

Dále následuje výpočet elektrických parametrů použitých vodičů pro stožárové konstrukce typu Portál a Dunaj. Pro co nejpřesnější výpočet kapacity vedení, pomocí metody zrcadlení, bylo nutné stanovit průměrnou výšku vodiče nad zemí, a to z toho důvodu, že výška vodiče nad zemí roste a klesá od závěsného bodu k maximálnímu průhybu vodiče. Hlavním měřítkem pro srovnání je vlnová impedance a přirozený výkon vodiče pro stávající a modernizované vedení. Pro vodič 362-AL1/59-ST1A vyšla vlnová impedance 290,88 – j12,4 Ω a přirozený výkon 549,5 MVA. Použitý vodič pro modernizaci 490 - AL1/64 - ST1A lze charakterizovat vlnovou impedancí 272,53 – j9,037 Ω a přirozeným výkonem 586,8 MVA. Je-li vedením přenášen výkon pod přirozeným výkonem, je jeho charakter kapacitní. V případě přenášení vyššího výkonu, než je výkon přirozený, lze toto vedení charakterizovat jako induktivní.

Poslední součástí této práce je ekonomické zhodnocení modernizace, kde jsem určil odhad cen materiálů a montáží. Celkovou cenu modernizace jsem spočetl na 2 427 784 600 Kč. Jeden kilometr vedení by tedy stál 27 746 000 Kč.

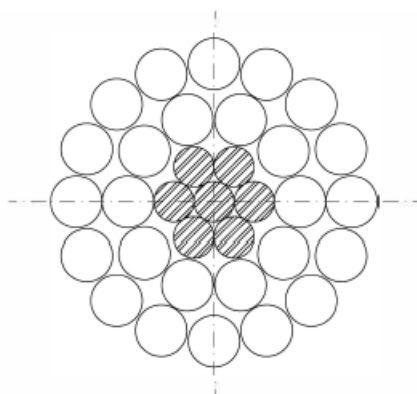
Literatura:

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk. Elektroenergetika. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1992. ISBN 80-7078-132-7
- [2] HRADÍLEK, Zdeněk. Elektroenergetika II. Skripta VŠB TUO 1993, ISBN 80-7078-195-5.
- [3] TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav, České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8
- [4] Přenosová soustava elektrické energie. TZB-info [online]. Prah: Topinfo, 2016 [cit.2021-05-29]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [5] ČEPS a.s. *Česká přenosová soustava* [online]. 2021. Dostupné také z: <http://www.ceps.cz/>
- [6] KOZÁK, Jiří. Ocelové stožáry a věže, SNTL Praha 1990. ISBN 80-03-00374-1
- [7] OTČENÁŠOVÁ, Alena. Mechanika vonkajších silových vedení. Žilina: EDIS, 2010. ISBN 978-80-554-0181-2.
- [8] SANTARIUS, Pavel. Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava 1993
- [9] TLUSTÝ, Josef. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí, České vysoké učení technické v Praze, 2011 ISBN 978-80-01-04939-6

Seznam příloh

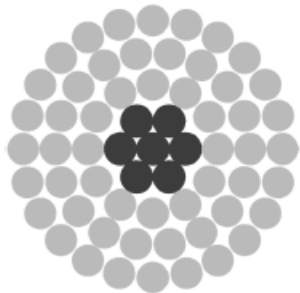
Příloha A	Technická data vodiče 362-AL1/59-ST1A
Příloha B	Technická data vodiče 490-AL1/64-ST1A
Příloha C	Náčrtek stožáru Portál
Příloha D	Náčrtek stožáru Dunaj
Příloha E	Větrné oblasti ČR
Příloha F	Námrazové oblasti ČR

Příloha A



typ type	362-AL1/59-ST1A, EN 50182, tab. F.7	
duše lana core	1+6 pozinkovaných ocelových drátů ST1A ø 3,28 mm (EN50189) 1+6 zinc coated steel wires ST1A diameter 3,28 mm (EN50189)	
	matematický průřez ocelových drátů steel wires crosssection	59,1 mm ² 59,1 mm ²
	ocelová duše lana mazaná (EN 50182, příloha B, obr. B.1a) steel core greased (EN 50182, annex B, figure B.1a)	
obal layers (envelope)	1. vrstva 10 hliníkových drátů AL1 ø 4,21 mm (EN 60889) 1-st layer 10 aluminium wires AL1 diam. 4,21 mm (EN 60889)	
	2. vrstva 16 hliníkových drátů AL1 ø 4,21 mm (EN 60889) 2-nd layer 16 aluminium wires AL1 diam. 4,21 mm (EN 60889)	
	matematický průřez AL drátů aluminium wires crosssection	361,9 mm ² 361,9 mm ²
	hliníkový obal nemazaný aluminium layers not greased	
lano cable	průměr lana overall diameter	26,7 mm 26,7 mm
	celkový průřez total area	421,1 mm ² 421,1 mm ²
	celková hmotnost total weight	1462,2 kg/km (1473,9 kg/km včetně mazadla) 1462,2 kg/km (1473,9 kg/km including grease)
	elektrický odpor stejnosměrný při +20 °C maximum DC resistance at +20 °C	0,0798 Ω/km 0,0798 Ω/km
	matematická pevnost rated strength	122,97 kN 122,97 kN
	směr vinutí vnější vrstvy lana pravotočivý direction of outer layer right	

Technická data lana
Cable data sheet



M 2:1

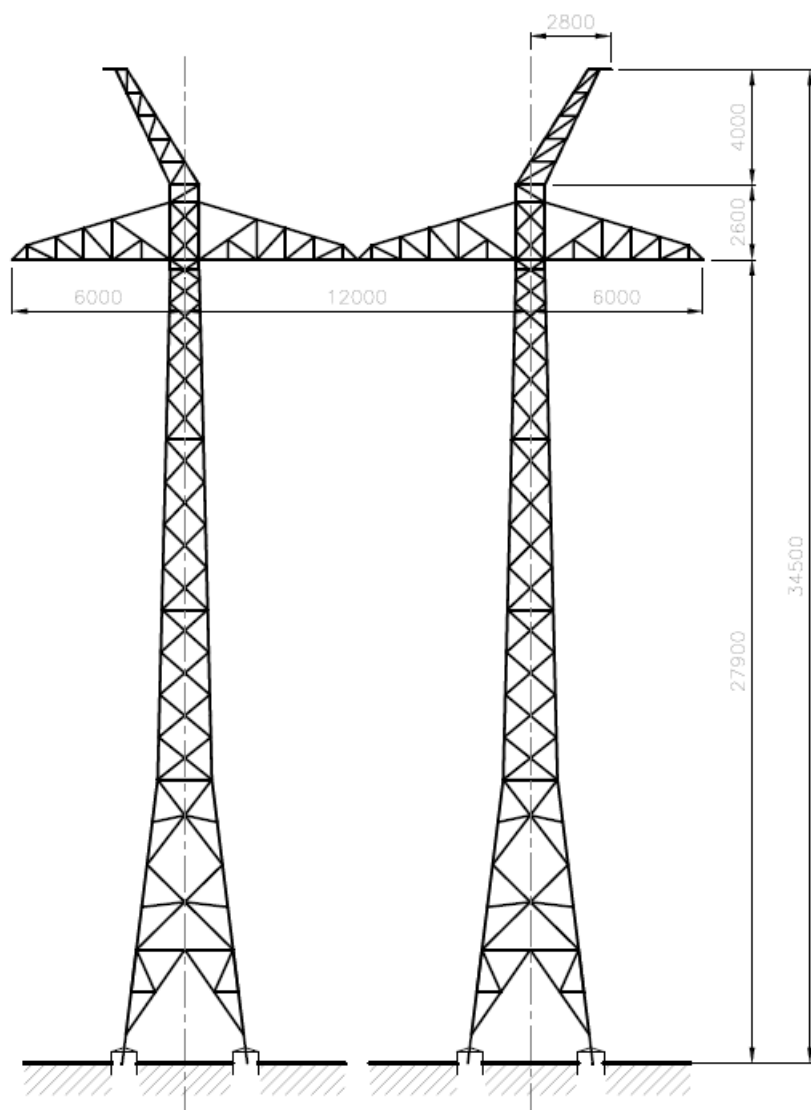
Označení vodiče (Conductor designation)	490-AL1/64-ST1A		
Fe duše lana (Steel core)	Materiál drátů (material of wire)	(-)	ST1A
	Počet drátů / konstrukce (number of wires)	(-)	1+6
	Jmenovitý průměr drátů (wire diameter)	(mm)	3,4
	Vypočtená hmotnost duše (steel core mass)	(kg.km ⁻¹)	497,02
	Celkový průřez duše (steel core sectional area)	(mm ²)	63,55
Al plášť lana (Envelope [Al layers])	Materiál drátů (material of wire)	(-)	AL1
	Počet drátů / konstrukce (number of wires)	(-)	12+18+24
	Jmenovitý průměr drátů (wire diameter)	(mm)	3,4
	Vypočtená hmotnost pláště (envelope mass)	(kg.km ⁻¹)	1355,83
	Celkový průřez pláště (envelope cross sectional area)	(mm ²)	490,28
Mazivo (Grease)	Mazaná pouze ocelová duše vodiče (podle EN 50182, příloha B, případ 1) (grease application according to EN 50182, case 1, steel core only greased)		
	Hmotnost maziva (nominal mass of grease)	(kg.km ⁻¹)	12,60
Lano (Cable total)	Jmenovitý průměr lana (overall diameter)	(mm)	30,60
	Celkový průřez lana (total cross sectional area)	(mm ²)	553,83
	Hmotnost lana bez maziva (conductor mass without grease)	(kg.km ⁻¹)	1852,85
	Hmotnost lana s mazivem (conductor mass including grease)	(kg.km ⁻¹)	1865,45
	Modul pružnosti (modul of elasticity) ^{*)}	(MPa)	70 500
	Součinitel teplotní délkové roztažnosti (coef. of linear exp.) ^{*)}	10 ⁶ (K ⁻¹)	19,44
	Jmenovitá pevnost v tahu (conductor rated tensile strength)	(kN)	150,81
	Elektrický stejnosměrný odpor při +20 °C bez ocelové duše (nominal resistance R _{DC} at +20 °C without steel core)	(Ω.km ⁻¹)	0,05898
	Směr vinutí vnější vrstvy (direction of outer lay)	(-)	pravotočivý (right-hand)

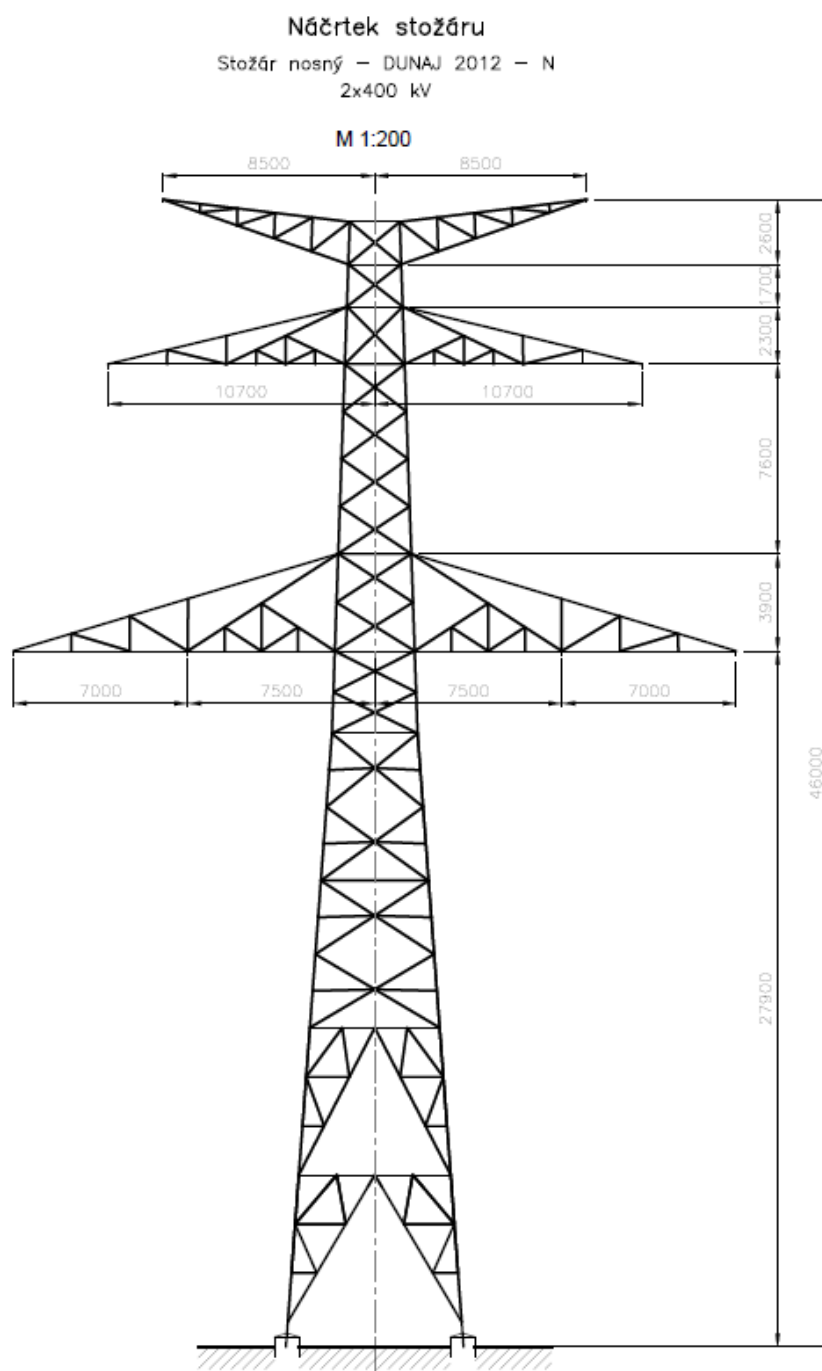
*) výpočet dle / calculation according to IEC/TR 61597

Náčrtek stožáru

Stožár nosný – PORTÁL 2016 – N12
1x400 kV

M 1:200





Příloha E

